

Cátia Vanessa Duarte Martins

**Avaliação da Suscetibilidade à Ocorrência de Movimentos de
Vertente na Bacia Hidrográfica da Meia Léguas: Modelação
Estatística e Simulação Matemática de Base Física**

Dissertação realizada no âmbito do Mestrado em Sistemas de Informação Geográfica e
Ordenamento do Território orientada pelo Professor Doutor Carlos Valdir de Meneses Bateira

Faculdade de Letras da Universidade do Porto

Setembro de 2015

Avaliação da Suscetibilidade à Ocorrência de Movimentos de Vertente na Bacia Hidrográfica da Meia Léguas: Modelação Estatística e Simulação Matemática de Base Física

Cátia Vanessa Duarte Martins

Dissertação realizada no âmbito do Mestrado em Sistemas de Informação Geográfica e
Ordenamento do Território orientada pelo Professor Doutor Carlos Valdir de Meneses Bateira

Membros do Júri

Professor Doutor Carlos Valdir de Meneses Bateira
Faculdade de Letras da Universidade do Porto - Universidade do Porto

Professor Doutor António Alberto Teixeira Gomes
Faculdade de Letras da Universidade do Porto – Universidade do Porto

Professor Doutor Laura Maria Pinheiro de Machado Soares
Faculdade de Letras da Universidade do Porto - Universidade do Porto

Classificação obtida: 19 valores

ÍNDICE GERAL

| | |
|---|----|
| Agradecimentos..... | 8 |
| Resumo..... | 9 |
| Abstract..... | 10 |
| Índice de figuras..... | 11 |
| Índice de tabelas..... | 14 |
| Lista de acrónimos e símbolos..... | 15 |
| Introdução e estrutura | 17 |
| Capítulo 1 – Enquadramento da Área de Estudo | 19 |
| 1.1. Clima..... | 20 |
| 1.2. Relevo e litologia | 21 |
| 1.3. Unidades de solo | 23 |
| 1.4. Ocupação do solo | 24 |
| Capítulo 2 – Estado Atual dos Conhecimentos..... | 28 |
| 2.1. Movimentos de vertente..... | 28 |
| 2.1.1. Tipologia | 29 |
| 2.1.2. Fatores desencadeantes e condicionantes..... | 35 |
| 2.2. Estabilidade de vertentes..... | 36 |
| 2.3. Avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente..... | 38 |
| 2.3.1. Conceitos..... | 38 |
| 2.3.2. Tipologia dos modelos..... | 39 |
| 2.3.3. Modelos utilizados | 42 |
| Capítulo 3. Dados..... | 53 |
| 3.1. Inventário | 53 |
| 3.2. Fatores topográficos..... | 56 |

| | |
|--|----|
| 3.2.1. Declives..... | 60 |
| 3.2.2. Áreas de contribuição..... | 60 |
| 3.2.3. Índice Topográfico de Humidade | 61 |
| 3.2.4. Altura estimada dos patamares | 62 |
| 3.2.5. Sistemas de armação do terreno..... | 63 |
| 3.2.6. Exposição de vertentes..... | 64 |
| 3.2.7. Curvatura de vertentes | 65 |
| 3.3. Parâmetros geofísicos | 66 |
| 3.3.1. Textura do solo | 66 |
| 3.3.2. Resistência do solo..... | 67 |
| 3.3.3. Condutividade hidráulica | 69 |
| 3.3.4. Capacidade de infiltração do solo | 70 |
| 3.3.5. Peso específico do solo | 70 |
| 3.3.6. Coesão do solo | 71 |
| 3.3.7. Ângulo de atrito interno | 72 |
| 3.3.8. Espessura do solo | 73 |
| 3.4. Considerações finais | 74 |
| Capítulo 4. Modelação, Simulação e Validação | 75 |
| 4.1. Modelação da suscetibilidade | 75 |
| 4.1.1. Valor Informativo | 75 |
| 4.1.2. Regressão Logística | 78 |
| 4.1.3. Validação | 82 |
| 4.1.4. Análise comparativa: modelação estatística..... | 87 |
| 4.2. Simulação da suscetibilidade | 88 |
| 4.2.1. SHALSTAB..... | 88 |
| 4.2.2. Validação | 94 |

| | |
|---|-----|
| 4.3. Análise comparativa das metodologias | 98 |
| Conclusões | 100 |
| Referências bibliográficas..... | 104 |
| Anexos | 110 |

Agradecimentos

Venho por este meio prestar gratidão a diversas pessoas que de algum modo contribuíram para a concretização com sucesso da presente dissertação de mestrado, nomeadamente, ao meu orientador, o Professor Doutor Carlos Bateira; à equipa de trabalho do laboratório de Geografia Física da FLUP, sobretudo ao Mestre Carlos Hermenegildo e ao Mestre Manuel Teixeira; ao Doutor Tomás Figueiredo do Instituto Politécnico de Bragança; ao Professor Doutor Alberto Gomes, ao Mestre António Costa e à Professora Doutora Laura Soares do Departamento de Geografia da FLUP; aos meus colegas e amigos e à minha família. A todos agradeço com carinho pelos conselhos e apoio apresentado.

Resumo

Apresenta-se e discute-se os resultados da modelação de suscetibilidade a deslizamentos translacionais na bacia hidrográfica da Meia Légua, localizada em Peso da Régua e Santa Marta de Penaguião com recurso a métodos de base estatística (Valor Informativo e de Regressão Logística). Apresenta-se ainda a simulação da instabilidade após a construção de patamares com taludes em terra, recorrendo ao modelo matemático de base física SHALSTAB.

É avaliada e comparada a capacidade preditiva dos modelos através da validação com a curva da taxa de sucesso, curva ROC e índices de diagnóstico das tabelas de contingência.

A modelação da suscetibilidade foi efetivada para o método de cálculo das áreas de contribuição (m^2) do algoritmo Multiple Flow Direction (MD8) – Modelo A – e do algoritmo D-Infinity ($D \infty$) – Modelo B.

A simulação da suscetibilidade apresenta modelos prospetivos para uma situação hipotética de intervenção na armação do terreno: patamares agrícolas com 1 e 2 bardos de vinha (2,5m e 3,5m de largura, respetivamente). Foram elaborados 3 modelos (A, B e C), com 20, 18 e 15° de ângulo de atrito interno.

Estes modelos foram extraídos para 8 áreas da área de estudo, reconvertidas em 2013 para patamares com taludes em terra, construídos entre os muros pós-filoxera de antigos terraços.

De acordo com a validação, o modelo de base estatística com maior capacidade preditiva é o Modelo A do Valor Informativo, com 73% no RVP e 75% na AAC, segundo a curva da taxa de sucesso.

Nos cenários de simulação, os modelos B e C apresentaram maior previsão no RVP e o modelo B foi melhor, devido ao RFP inferior. Todavia, concluímos que todos podem ser utilizados na intervenção preventiva, consoante as características das várias áreas da Bacia da Meia Légua e do tipo de intervenção a desenvolver.

Concluímos que os terraços agrícolas com 1 bardo de vinha são menos suscetíveis a processos de instabilidade. Além disso, localizamos as áreas onde é possível instalar patamares com 2 ou apenas 1 bardo de vinha.

Palavras-chave: modelação estatística; movimentos de vertente; simulação matemática de base física; suscetibilidade; validação.

Abstract

Is presented and discussed the susceptibility maps to the translational landslides in the Meia Léguas watershed located at Peso da Régua and Santa Marta de Penaguião based on the methods of Information Value and Logistic Regression. It was made a simulation of slope instability before the implementation of agricultural terraces using the physically based SHALSTAB model.

It is evaluated and compared the predictive capability of the models by validation through success rate curve, ROC curve and contingency tables diagnosis rates.

The susceptibility modelling used two different contribution areas calculation method (m^2) Multiple Flow Direction (MD8) algorithm – Model A –and D-Infinity ($D \infty$) algorithm – Model B.

The susceptibility simulation presented prospective models for one ground frame intervention project: agricultural terraces from 1 and 2 vineyard bards (2,5 and 3,5m width, respectively). For each type of agricultural terraces 3 models were produced (A, B and C) with internal friction angle from 20, 18 and 15°.

These models were extracted for 8 areas reconverted in 2013 to land embankments terraces built between ancient terraces post-phylloxera walls from study area.

According validation the statistical based model with higher predictive capability is Model A from Information Value with com 73% on the RVP e 75% in the AAC according to the success rate curve.

On the simulation scenarios the B and C models had higher prediction on the RVP and the model B was better due to the lower RFP. However we conclude that all may be used in preventive intervention, according the characteristics of the terrain and type of the programed intervention.

We concluded that 1 vineyard bard agricultural terraces are less susceptible to instability processes. Also we locate the areas where can be installed terraces with 2 or only 1 vineyard bard.

Keywords: statistical modelling; slope movements; geophysical simulation; susceptibility; validation.

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Fluxo de trabalho da dissertação. | 17 |
| Figura 2 - Localização da bacia hidrográfica da Meia Léguas. Fonte: Atlas Digital do Ambiente (APA); Direção-Geral do Território; DIVA-GIS; IGEOE. | 19 |
| Figura 3 – Enquadramento climático da bacia hidrográfica da Meia Léguas. Fonte: Atlas Digital do Ambiente (APA); Daveau (1977); DIVA-GIS..... | 20 |
| Figura 4 – Enquadramento morfo-estrutural da bacia hidrográfica da Meia Léguas. Fonte: Geológica de Portugal – folha 10C (1:50 000); CCDRN (fraturação); TERRISC (morfologia).22 | |
| Figura 5 - Unidades de solo da bacia hidrográfica da Meia Léguas. Fonte: Carta de Solos do Nordeste de Portugal à escala 1:100 000 (Coba, 1991); IGEOE. | 23 |
| Figura 6 - Sistemas de armação do terreno: A) terraços pré-filoxéricos; B) terraços pós-filoxéricos; C) novos patamares com taludes em terra; D) vinha ao alto. Adaptada de Mayson (1999). | 25 |
| Figura 7 - Sistemas de armação do terreno na bacia hidrográfica da Meia Léguas: A) socalcos pré-filoxéricos; B) terraços pós-filoxéricos e patamares com talude em terra; C) vinha ao alto; D) “micropatamares” e muros de suporte em pedra seca de antigos terraços pós-filoxéricos..... | 27 |
| Figura 8 - Esquema de desabamento de rocha (rockfall). Extraída de Highland e Bobrowsky (2008). | 29 |
| Figura 9 - Esquema de balançamento (topple). Extraída de Highland e Bobrowsky (2008). | 30 |
| Figura 10 - Esquema de deslizamento rotacional (rotational slide/slump). Adaptada de Highland e Bobrowsky (2008). | 31 |
| Figura 11 - Esquema de deslizamento translacional (translational slide). Adaptada de Highland e Bobrowsky (2008). | 32 |
| Figura 12 - Esquema de expansão lateral (lateral spreading). Adaptada de Highland e Bobrowsky (2008). | 33 |
| Figura 13 - Esquema de fluxo de detritos (debris flow). Extraída de Highland e Bobrowsky (2008). | 34 |

| | |
|--|----|
| Figura 14 - Esquema de avalanche de detritos (debris avalanche). Extraída de Highland e Bobrowsky (2008)..... | 35 |
| Figura 15 - Esquema das tensões que atuam na superfície potencial de rutura. Adaptada de Selby (1993), in Vieira (2007). | 37 |
| Figura 16 - Esquema representativo da obtenção da espessura do solo (z) mediante ABCD ou AEFD. β = ângulos de EAB e de FDC; $\cos\beta = e / z$; $e = z \cos\beta$. Adaptada de Selby (1993), in de Vieira (2007). | 38 |
| Figura 17 - Elementos topográficos considerados pelo modelo TOPOG de O’Loughlin (1986). Adaptada de David R. Montgomery & Dietrich (1994). | 44 |
| Figura 18 - Condições de estabilidade. A linha tracejada representa o limite de saturação e as letras A à G na figura B representam as condições de estabilidade da Tabela 1. Adaptada de David R. Montgomery & Dietrich (1994)..... | 47 |
| Figura 19 - Representação hipotética dos testes de hipóteses. Adaptada de Braga (2000). | 51 |
| Figura 20 - Inventário de movimentos de vertente realizado entre 2004 e 1006. Fonte do inventário: TERRISC. Fonte do mapa: Direção-Geral do Território; IGEOE. | 53 |
| Figura 21 - Inventário de movimentos de vertente realizado em 2015 nas áreas alteradas em 2013. Fonte: IGEOE..... | 54 |
| Figura 22 - Exemplos de instabilidade na bacia hidrográfica da Meia Léguas: A) deslizamento típico da área de estudo associado a queda de muro; B) muro reconstruído..... | 55 |
| Figura 23 - Fatores topográficos da bacia hidrográfica da Meia Léguas. Fonte: Direção-Geral do Território; IGEOE. | 58 |
| Figura 24 - Frequência relativa da área das classes e da área deslizada por classe dos fatores topográficos da bacia hidrográfica da Meia Léguas. | 59 |
| Figura 25 - Textura do solo na parcela RA. Adaptada de Bateira et al. (2005, p. 5). | 67 |
| Figura 26 - Perfil de resistência do solo (5 - 40cm) na parcela RA. Adaptada de Bateira et al. (2005). | 68 |
| Figura 27 - Perfis transversais e longitudinal de resistência do solo na parcela RA. Adaptada de Bateira et al. (2005). | 68 |
| Figura 28 - A) amostras de solo recolhidas com tubos de PVC; B) enquadramento geográfico na bacia hidrográfica da Meia Léguas. Fonte: IGEOE. | 71 |
| Figura 29 – Valor Informativo: A) Modelo A (MD8); B) Modelo B ($D \infty$). Fonte: IGEOE. | 77 |

Figura 30 – Regressão Logística: A) Modelo A (MD8); B) Modelo B ($D \infty$). Fonte: IGEOE.

| | |
|---|----|
| | 81 |
| Figura 31 - Curva da taxa de sucesso do Modelo A do Valor Informativo. | 83 |
| Figura 32 - Curva da taxa de sucesso do Modelo B do Valor Informativo..... | 83 |
| Figura 33 - Curva da taxa de sucesso do Modelo A de Regressão Logística. | 84 |
| Figura 34 - Curva da taxa de sucesso do Modelo B de Regressão Logística..... | 84 |
| Figura 35 - Curva ROC do Modelo A de Regressão Logística..... | 85 |
| Figura 36 - Curva ROC do Modelo B de Regressão Logística..... | 86 |
| Figura 37 - SHALSTAB: patamares agrícolas com 1 bardo de vinha. Fonte: IGEOE..... | 91 |
| Figura 38 - SHALSTAB: patamares agrícolas com 2 bardos de vinha. Fonte: IGEOE. .. | 92 |

Índice de tabelas

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Classes de estabilidade e de saturação do modelo SHALSTAB. Adaptada de Dietrich & Montgomery (1998), in Vieira (2007). | 48 |
| Tabela 2 - Tabela de contingência 2x2 segundo a teoria de detecção de sinal. Adaptada de Braga (2000)..... | 50 |
| Tabela 3 - Erros do tipo I e II..... | 51 |
| Tabela 4 - Scores do Valor Informativo por classe..... | 76 |
| Tabela 5 - Coeficientes padronizados do Modelo A de Regressão Logística..... | 79 |
| Tabela 6 - Coeficientes padronizados do Modelo B de Regressão Logística..... | 80 |
| Tabela 7 - Resultados da validação do método do Valor Informativo..... | 87 |
| Tabela 8 - Resultados da validação do método de Regressão Logística..... | 87 |
| Tabela 9 - Resultados da validação dos melhores cenários dos métodos estatísticos em análise..... | 87 |
| Tabela 10 - Resultados da validação do método SHALSTAB para patamares com 1 bardo de vinha na bacia hidrográfica da Meia Légua..... | 95 |
| Tabela 11 - Resultados da validação do método SHALSTAB para patamares com 2 bardos de vinha na bacia hidrográfica da Meia Légua..... | 95 |
| Tabela 12 - Resultados da validação do método SHALSTAB para patamares com 1 bardo de vinha nas áreas alteradas em 2013..... | 96 |
| Tabela 13 - Resultados da validação do método SHALSTAB para patamares com 2 bardos de vinha nas áreas alteradas em 2013..... | 96 |
| Tabela 14 - Resultados da análise comparativa entre os melhores modelos do Valor Informativo e do SHALSTAB nas áreas com sistemas de armação do terreno da bacia hidrográfica da Meia Légua..... | 98 |
| Tabela 15 - Resultados da análise comparativa entre os melhores modelos do Valor Informativo e do SHALSTAB extraídos para as áreas alteradas em 2013. | 98 |

Lista de acrónimos e símbolos

a – Área de contribuição a montante

AAC – Área Abaixo da Curva

ACC – Acurácia ou fiabilidade

ADV - Alto Douro Vinhateiro

b – Largura da unidade de terreno

c/c' – Coesão do solo/coesão efetiva

cos - Cosseno

D ∞ - Algoritmo D-Infinity

D8 - Algoritmo Deterministic 8

d_w – Coluna de água acima do plano de rutura

e/z – Espessura do solo/espessura do solo instável

F1 - Rácio de Medição - média ponderada da precisão dos Verdadeiros Positivos

FFN – Fração de Falsos Negativos

FFP – Fração de Falsos Positivos

FS – Fator de Segurança

FVN – Fração de Verdadeiros Negativos

FVP – Fração de Verdadeiros Positivos

g – Força da gravidade

h – Altura da coluna de água acima do plano de rutura

i – Gradiente hidráulico

K_{fs} – Condutividade hidráulica saturada de campo

K_{nsat-0} – Condutividade hidráulica não saturada

K_{sat} – Condutividade hidráulica saturada

MD8 - Algoritmo Multiple Flow Direction

MDE – Modelo Digital de Elevação

PPV – Precisão ou potencial de deslizamento

p_s – Peso específico do solo

p_w – Peso específico da água

Q/q – Precipitação

RDD – Região Demarcada do Douro

RFP - Rácio de Falsos Positivos

ROC – Receiver Operating Characteristics
RVP - Rácio de Verdadeiros Positivos
S – Área de secção transversal saturada
S/t – Resistência ao cisalhamento
sen - Seno
SHALSTAB - Shallow Landslide Stability Analysis
SIG – Sistemas de Informação Geográfica
T – Tensão de cisalhamento; transmissividade
tan - Tangente
v – Velocidade do fluxo de água
W/TWI – Índice de Humidade/Índice Topográfico de Humidade
 β/θ – Declive
 μ - Pressão intersticial
 Φ/Φ' - Ângulo de atrito interno/ângulo de atrito interno efetivo
 γ – Peso volumétrico natural do solo
 γ_{sat} – Peso volumétrico do solo saturado
 σ/σ' – Tensão normal total /tensão normal efetiva

Introdução e estrutura

Os movimentos de vertente enquanto riscos naturais, designadamente geomorfológicos, vêm assumindo destaque em estudos desenvolvidos em Portugal (Zêzere, 1997; Bateira, 2001; Pereira, 2009; Teixeira, 2012; Faria, 2014; Oliveira, 2014). A inserção destes fenómenos no âmbito do Planeamento e Ordenamento do Território e da Proteção Civil e a publicação de normas, princípios e metodologias de cartografia inerentes a essa inserção (Julião *et al.*, 2009), contribuiu para a consciencialização acerca da relevância desta temática.

Esta dissertação enquadra-se no domínio da modelação da instabilidade de vertentes a partir da Cartografia de suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos translacionais no vale do Douro, tendo como objetivo principal avaliar a suscetibilidade na bacia hidrográfica da Meia Légua através da aplicação de metodologias de Cartografia Indireta. A Figura 1 representa a sequência metodológica da presente dissertação.

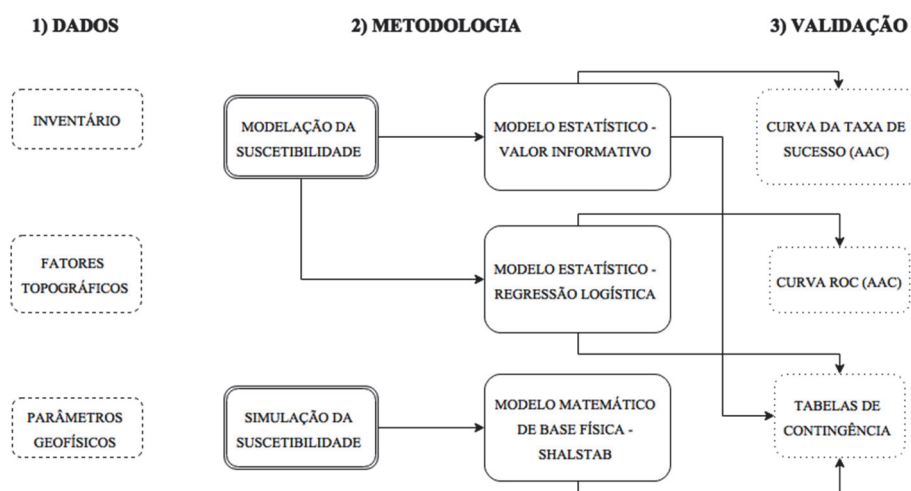


Figura 1 - Fluxo de trabalho da dissertação.

Os objetivos específicos são:

- Recolha dos dados de base do trabalho de investigação: inventários, fatores topográficos e parâmetros geofísicos;
- Modelação da suscetibilidade com dois métodos de base estatística: Valor Informativo e Regressão Logística;
- Análise comparativa de dois métodos de cálculo das áreas de contribuição: o método do algoritmo D-Infinity (D_{∞}) de Tarboton D. G. (1997) e o método do algoritmo Multiple Flow Direction (MD8) de Quinn P. *et al.* (1991);

- Simulação da suscetibilidade após a construção de patamares com taludes em terra, recorrendo ao método matemático de base física SHALSTAB, isto é, a construção de modelos prospetivos para uma situação hipotética de intervenção na armação do terreno: patamares agrícolas com taludes em terra com 1 e 2 bardos de vinha (2,5m e 3,5m de largura, respetivamente);
- Avaliação e comparação da capacidade preditiva dos modelos através da validação com a curva da Taxa de Sucesso, com a curva ROC e com os índices de diagnóstico das tabelas de contingência.

Os fatores condicionantes da instabilidade da bacia da Meia Léguas selecionados para os métodos de base estatística foram os declives, as áreas de contribuição, o Índice Topográfico de Humidade, as alturas estimadas dos patamares, os sistemas de armação do terreno, a exposição de vertentes e a curvatura de vertentes. Para o método matemático de base física foram utilizados os declives, as áreas de contribuição, o peso específico do solo (p_s), a coesão do solo (c'), o ângulo de atrito interno (Φ) e a espessura do solo instável (z).

Os métodos implementados no presente trabalho de investigação foram validados segundo a curva da taxa de sucesso, a curva ROC e de acordo com índices de diagnóstico, calculados a partir do método das tabelas de contingência.

Relativamente à estruturação dos conteúdos, a dissertação é constituída por 4 capítulos.

O primeiro capítulo aborda o enquadramento da área em estudo, nomeadamente o enquadramento geográfico e morfo-estrutural, as características climáticas (precipitação e temperatura) e a ocupação do solo.

O segundo capítulo remete para o enquadramento conceptual dos movimentos de vertente (tipologia e fatores desencadeantes e condicionantes), da estabilidade de vertentes e da avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente, de acordo com a terminologia e metodologias de análise e de validação de riscos geomorfológicos.

O terceiro capítulo apresenta os materiais e métodos recolhidos e empregues na presente dissertação. Este capítulo descreve os dados de base do trabalho de investigação, designadamente os inventários de ocorrências de movimentos de vertente, os fatores topográficos e os parâmetros geofísicos.

O quarto capítulo apresenta a análise e discussão dos resultados das metodologias de análise adotadas, bem como, dos resultados da validação, através da análise comparativa dos cenários com maior capacidade preditiva.

Capítulo 1 – Enquadramento da Área de Estudo

A bacia hidrográfica da ribeira da Meia Légua situa-se numa área de transição entre o Minho e Trás-os-Montes, na sub-região do Baixo Corgo da Região Demarcada do Douro e junto ao vale do rio Douro (Figura 2).

A Meia Légua pertence ao distrito de Vila Real e reparte-se pelos municípios de Peso da Régua (União de freguesias Peso da Régua e Godim, Loureiro e União de freguesias de Moura Morta e Vinhós) e de Santa Marta de Penaguião (Medrões, União de freguesias de Lobrigos (S. Miguel e S. João Baptista) e Sanhoane).

A bacia hidrográfica apresenta uma área de 18km², 20km de perímetro, a altitude varia entre 46 e 666m e a altitude média é 306m (Figura 2).

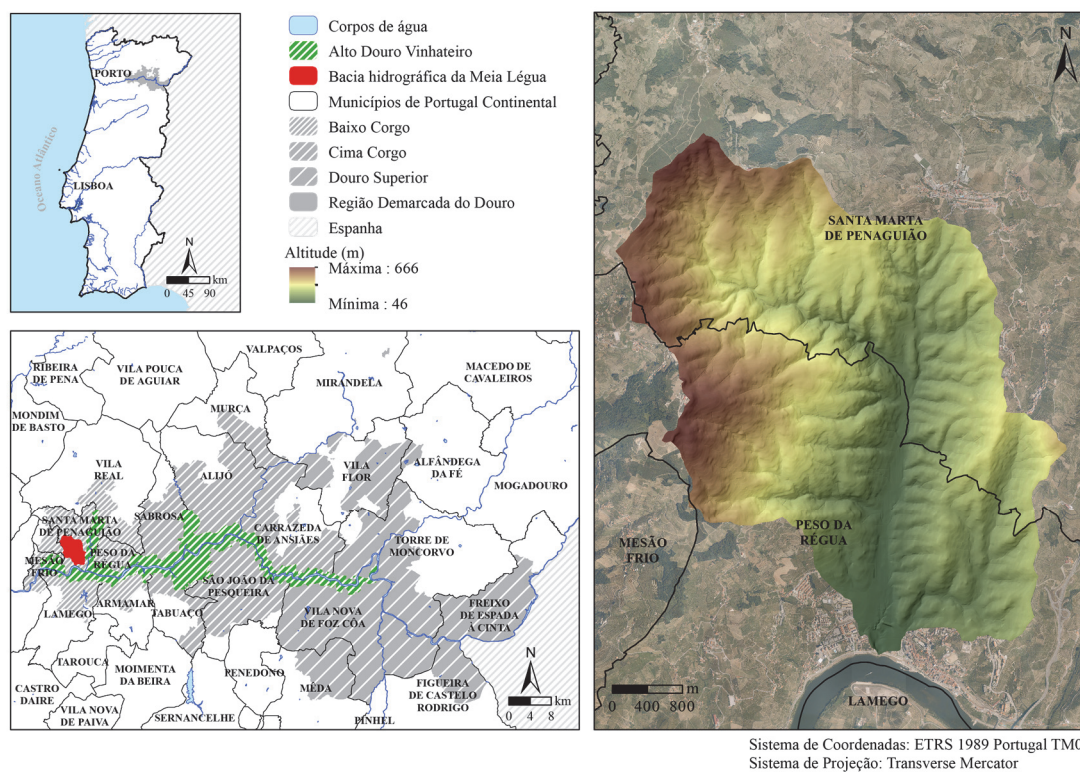


Figura 2 - Localização da bacia hidrográfica da Meia Légua. Fonte: Atlas Digital do Ambiente (APA); Direção-Geral do Território; DIVA-GIS; IGEOE.

1.1. Clima

As características climáticas desta região do Nordeste de Portugal Continental são condicionadas pelos sistemas montanhosos a Oeste e pelo forte encaixe do vale do Douro e rios afluentes. Verifica-se assim um “microclima” contrastado em que os Verões são muito quentes e os Invernos frescos (Daveau, 1995).

Daveau (1995, p. 111) refere que estas condições naturais locais propiciaram o desenvolvimento da região do vinho do Porto devido à sua localização junto ao rio Douro, um rio navegável e de “longa tradição de trocas comerciais com a Europa do Norte.”

A bacia hidrográfica da Meia Légua tem uma posição privilegiada quanto à história da região do vinho do Porto por localizar-se na sub-região do Baixo Corgo. O vinho do Porto foi primeiramente produzido no Baixo Corgo. Aqui, o vale do Douro encontra a sua parte mais ocidental, abrigada dos ventos marítimos húmidos pelos conjuntos montanhosos do Marão-Alvão e de Montemuro (Daveau, 1995).

De acordo com Ferreira (2005, in Bateira *et al.*, 2011, p. 12), nesta região, “a distribuição sazonal da precipitação concentra-se no fim do Outono e início do Inverno, com um máximo secundário em Março ou Abril”, desencadeando processos de instabilidade nas vertentes.

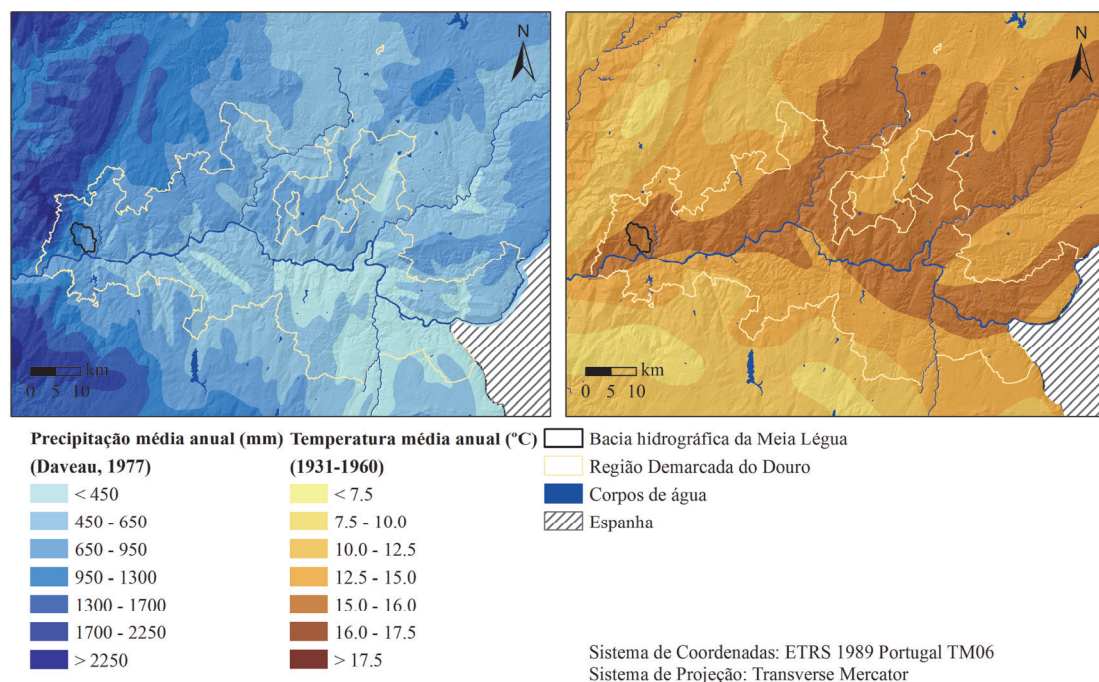


Figura 3 – Enquadramento climático da bacia hidrográfica da Meia Légua. Fonte: Atlas Digital do Ambiente (APA); Daveau (1977); DIVA-GIS.

Segundo Daveau (1995), os valores médios de precipitação anual (1931-60) na RDD podem ser inferiores a 500mm. Contudo, na sub-região do Baixo Corgo, os valores são bastante superiores (650 - 2250mm), principalmente em Peso da Régua e Santa Marta de Penaguião (> 800mm) (Figura 3).

Conforme o mapa de Daveau (1977), na área da bacia hidrográfica a precipitação média anual varia entre 1300mm (extremo ocidental) e 950mm (sector oriental) (Figura 3). Complementando, conforme Pedrosa *et al.* (2004, p. 212), entre 1931-60, em Peso da Régua registou-se uma precipitação média anual de 855,7mm. Ainda de acordo com Pedrosa *et al.* (2004, p. 214), entre 1992-02, Peso da Régua registou uma média anual de 852,2mm e Santa Marta de Penaguião registou 582,8mm.

A RDD apresenta igualmente valores médios anuais consideravelmente baixos no que concerne ao número de dias de precipitação. Na região da área em estudo (1931-60) os valores médios oscilam entre 75 e 100 dias de precipitação por ano (Atlas do Ambiente, 1974, in Bateira *et al.*, 2011).

Relativamente à temperatura média anual (°C), de 1931-60, na área em estudo verifica-se uma variação entre 16 e 17,5°C, devido à localização da bacia hidrográfica junto ao vale do Douro pois, constata-se que os valores de temperatura na RDD diminuem à medida que nos afastamos do rio Douro (Figura 3).

1.2. Relevo e litologia

A bacia hidrográfica da Meia Légua situa-se na Zona Centro-Ibérica (ZCI) do Maciço Hespérico e apresenta características litológicas das formações do Grupo do Douro (Super-Grupo Dúrico-Beirão de idade câmbria). Este grupo é descrito por uma sucessão estratigráfica ao longo do vale do rio Douro, entre Miranda do Douro e Peso da Régua, composta por xistos e grauvaques (sequência anteriormente designada por Complexo Xisto-Grauváquico ante-Ordovício) (Moreira *et al.*, 2010).

De acordo com a folha 10C da Carta Geológica de Portugal na escala 1:50 000, a bacia hidrográfica da Meia Légua é essencialmente constituída por filitos ou xistos luzentes e por depósitos de terraços recentes (areias e cascalheiras fluviais). A área de filitos ocupa 18 km² da bacia hidrográfica (Figura 4).

Na Carta Geológica de Portugal na escala 1:500 000 a litologia dominante (filitos ou xistos luzentes) é denominada por Formação Desejosa e as formações superficiais por depósitos de vertente do Plistocénico.

A Formação da Desejosa é a subunidade litológica principal do sector geomorfológico metassedimentar e é caracterizada por filitos cloríticos com níveis de metassiltitos e metagrauwaques. A presença de filitos e de pelitos significa a presença de argila e de silte, materiais detríticos que podem explicar a instabilidade nesta bacia hidrográfica por saturação do solo (Bateira *et al.*, 2011).

As formações superficiais do vale da ribeira da Meia Légua junto ao rio Douro são aluviões, isto é, areias, argila e materiais derivados das cascalheiras do Quaternário.

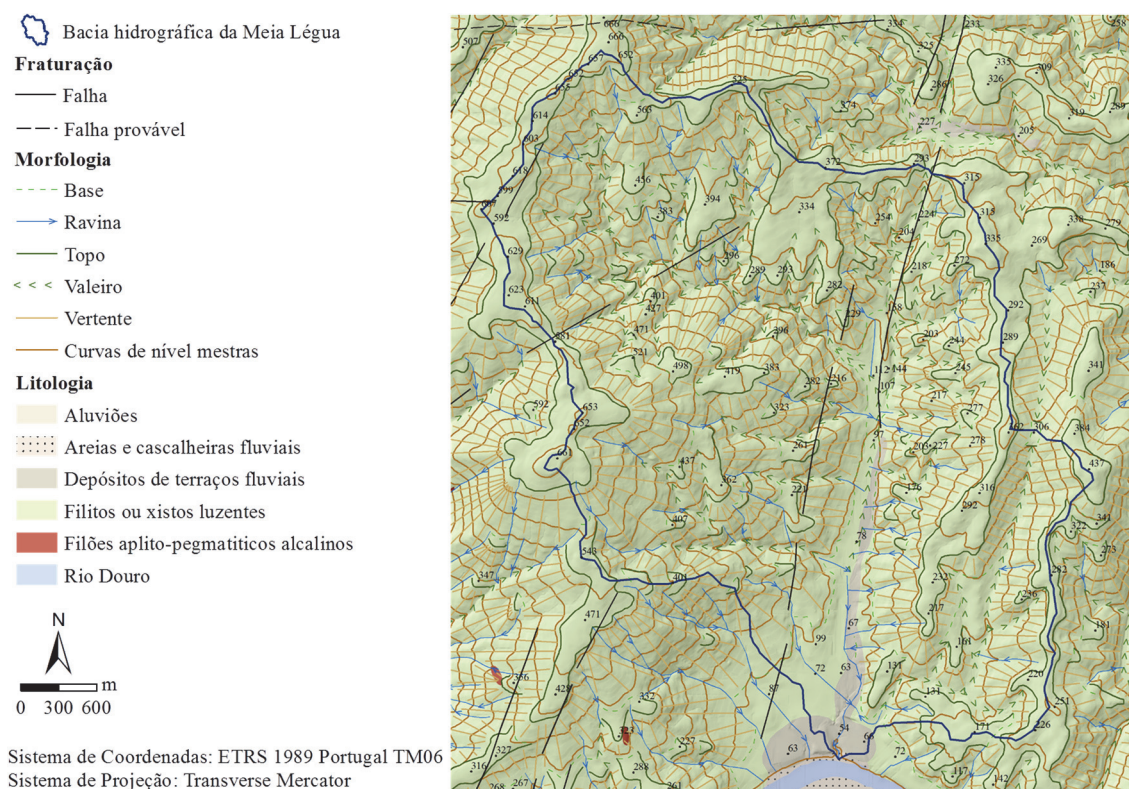


Figura 4 – Enquadramento morfo-estrutural da bacia hidrográfica da Meia Légua. Fonte: Geológica de Portugal – folha 10C (1:50 000); CCDRN (fraturação); TERRISC (morfologia).

Os traços estruturais da bacia hidrográfica (Figura 4) expõem direções fundamentalmente NNE-SSW, cujo sistema principal é Penacova-Régua-Verin. A rede de fracturação está relacionada com a evolução tectónica da orogenia Alpina, com a reativação de falhas “tardi-variscas” (Moreira *et al.*, 2010). A tectónica evidencia a assimetria da bacia hidrográfica, nomeadamente o carácter mais acidentado do relevo na parte ocidental da bacia.

Contrariamente ao padrão geral do vale do Douro, a bacia hidrográfica da Meia Légua não apresenta declives acentuados e os vales encaixos são restritos a pequenos setores. A Meia Légua apresenta vales mais largos e abertos e um declive médio de 17° (0 – 56°).

1.3. Unidades de solo

As unidades cartográficas de solos foram extraídas da Carta de Solos do Nordeste de Portugal à escala 1:100 000 elaborada por Agroconsultores e Coba em 1991 e a legenda foi adaptada da Carta de Solos do Mundo da FAO/UNESCO (1988) (Figueiredo, 2013).

As unidades cartográficas presentes na bacia hidrográfica da Meia Légua são: fluviSSolos dístricos órticos de aluviões, leptossolos úmbricos de xisto e antrossolos áricos surríbicos dístricos de xisto. Os antrossolos áricos surríbicos dominam claramente a área em estudo (Figura 5).

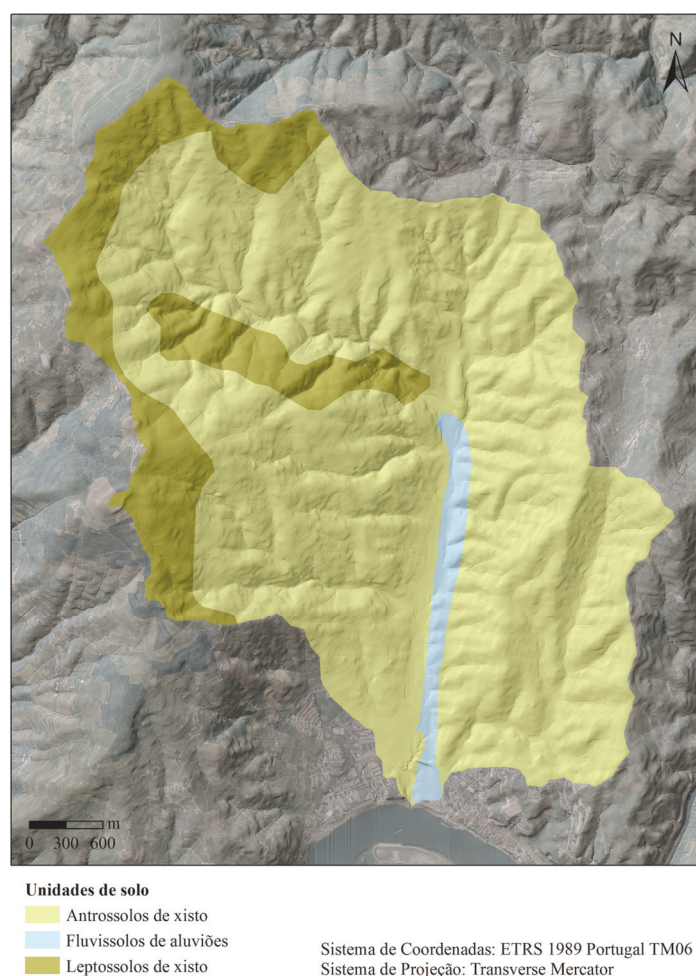


Figura 5 - Unidades de solo da bacia hidrográfica da Meia Légua. Fonte: Carta de Solos do Nordeste de Portugal à escala 1:100 000 (Coba, 1991); IGEOE.

Figueiredo (2013, pp. 18 – 19) apresenta um quadro que sintetiza as características das *Unidades Pedológicas Principais do Nordeste de Portugal*. De acordo com o quadro, os leptossolos são “solos delgados e de elevada pedregosidade (limitados por rocha dura < 50cm de

profundidade)”. Os leptossolos úmbricos caracterizam-se por um teor médio/elevado de matéria orgânica e cor escura no Horizonte A. Relativamente aos fluvisolos o autor afirma que, são solos “espessos, desenvolvidos sobre os depósitos das planuras aluviais”. Os fluvisolos dístricos são solos ácidos e de textura mediana. Quanto aos antrossolos áricos surrúbicos, estes resultaram da “ação de mobilizações profundas ou deslocamentos materiais a partir de cortes ou enchimentos, com alteração profunda dos horizontes originais, dos quais podem ainda encontrar-se porções remanescentes”. Este tipo de antrossolos são “resultantes de mistura de Leptossolos originais com o produto do desmantelamento da rocha”, apresentando uma elevada pedregosidade e um “horizonte A em geral incipiente devido à relativamente recente intervenção”.

Em suma, os solos anteriores à intervenção antrópica nas vertentes da RDD presentes na bacia hidrográfica da Meia Léguas são os leptossolos e o fluvisolos. Estes solos de origem xistosa têm espessuras e cor variáveis e assentam diretamente sobre a rocha-mãe. Os fluvisolos caracterizam-se por formações superficiais aluvionares recentes de maior profundidade.

Os antrossolos são produto da forte e longa intervenção humana na organização das vertentes para a prática vitícola. Surgiram assim da necessidade de fazer a surriba às vertentes para a armação da vinha mediante a destruição da rocha-mãe (> 1m de profundidade). Os antrossolos são compostos essencialmente por texturas entre o “fraco-arenosa fino e o franco-limosa e limosas” e tal como os restantes solos dominantes na bacia hidrográfica contêm uma elevada pedrosidade e impermeabilidade (IVDP, s/d).

Sinteticamente, as áreas potencialmente instáveis localizam-se nos antrossolos e leptossolos porque, os fluvisolos situam-se no fundo do vale da ribeira da Meia Léguas. Os antrossolos e leptossolos diferenciam-se essencialmente pela estrutura dos materiais constituintes. Este processo de remobilização pelos trabalhos agrícolas resulta numa reduzida compactação dos materiais e consequente saturação dos solos.

1.4. Ocupação do solo

A organização dos terrenos para a produção vitícola na RDD implica a modificação das vertentes para a instalação das vinhas. Os sistemas de armação dividem-se em: tradicionais, correspondendo a antigos terraços pré-filoxéricos, constituídos por muros de suporte de pedra solta retirada dos terrenos e os socacos pós-filoxera; e “mecanizados”: novos patamares com taludes em terra e armação da vinha ao alto (Figura 6).

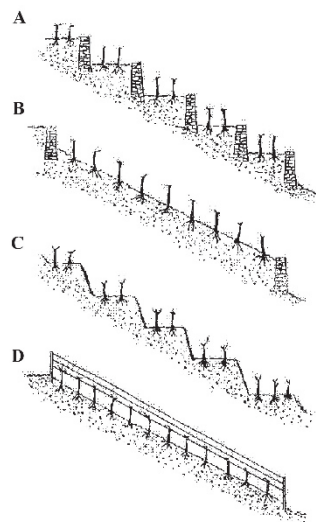


Figura 6 - Sistemas de armação do terreno: A) terraços pré-filoxéricos; B) terraços pós-filoxéricos; C) novos patamares com taludes em terra; D) vinha ao alto. Adaptada de Mayson (1999).

Os antigos patamares pré-filoxéricos consistem em terraços com muros de suporte em pedra seca, relativamente baixos e dispostos ortogonalmente ao declive das vertentes. Estes terraços permitem plantar 1 a 2 fiadas de vinha devido à sua largura reduzida (IVDP, s/d).

Os tradicionais terraços pós-filoxéricos surgiram após a destruição dos vinhedos pela filoxera (século XIX). Estes terraços apresentam uma geometria diferente: são mais largos, com menor declive face à inclinação original da superfície topográfica e consequentemente com muros de suporte mais altos e retilíneos. As videiras são organizadas segundo filas horizontais de acordo com as curvas de nível em compassos estreitos e podem comportar entre 10 a 30 bardos (IVDP, s/d).

A plantação das vinhas em patamares com taludes de terra surgiu nos anos 70 do século XX, devido a uma crescente necessidade de mecanização dos trabalhos agrícolas e ao aumento do custo da mão-de-obra. A construção dos novos patamares exige a maior parte das vezes uma fase prévia em que as máquinas atenuam o declive da própria vertente, logo, esta técnica altera consideravelmente a topografia original. De seguida, constroem-se os patamares com as respetivas zonas de aterro e escavação. A mecanização é assegurada por tratores vinhateiros que circulam pelas ruas de acesso aos patamares (IVDP, s/d).

Este sistema de armação consistiu inicialmente na armação de patamares horizontais ou sub-horizontais segundo as curvas de nível entre 3,5 a 4m de largura com taludes em terra, possibilitando a implantação de 2 linhas de videiras. Posteriormente optou-se por um sistema de patamares com 1 único bardo devido a limitações no cultivo da vinha e na sua mecanização. A

largura dos patamares foi então reduzida para 2,3 a 2,8m, permitindo a instalação de uma linha de videiras, armada na parte exterior ou zona de maior aterro (a 40 - 50 cm do bordo do patamar). Estes patamares possuem automaticamente alturas inferiores, logo, condições de maior estabilidade (IVDP, s/d).

O sistema de armação do terreno em vinhas ao alto começou a ser instalado na RDD a partir da década de 80. Neste sistema de armação, as videiras organizam-se segundo linhas perpendiculares às curvas de nível (de maior declive), não excedendo os 35 – 40% de declive. Estas plataformas são separadas por estradas de trabalho para a mecanização das práticas agrícolas (IVDP, s/d).

Quanto à hidrologia de vertentes, nos socacos tradicionais a organização da drenagem faz-se por “pequenos canais de drenagem paralelos às curvas de nível e que desviam a água do centro dos socacos, não permitindo desta forma a concentração e saturação dos mesmos” (Bateira *et al*, 2011, p. 26). Nos novos patamares de taludes em terra e nas vinhas ao alto o escoamento é direcionado para os caminhos de acesso (linhas artificiais de escoamento), que geralmente não seguem as linhas de drenagem antigas (Bateira *et al*, 2011).

Têm sido feitos esforços no sentido de adaptar os terraços tradicionais às técnicas de mecanização, sobretudo os terraços pós-filoxéricos, para deste modo fomentar a preservação dos socacos tradicionais e o cumprimento dos condicionalismos atribuídos pelo Plano Intermunicipal de Ordenamento do Território (PIOT), devido à classificação de Património Mundial da UNESCO.

Nesse sentido, nos terraços pré-filoxéricos foram propostos “micropatamares” com 1 linha de vinha (cerca de 1,60m de largura) para a utilização de máquinas de pequena dimensão. Nos terraços pós-filoxéricos de menor dimensão surgiu a hipótese de instalar 3 a 4 fiadas de vinha horizontais e um caminho (entre os bardos e o muro) para a passarem do trator vinhateiro. Nos terraços mais largos e altos têm sido instalados patamares entre os muros com 1 a 3 bardos de vinha e espaçamento de 2m para a passagem de maquinaria (IVDP, s/d).

Na área de estudo observaram-se todos os tipos de sistematização das encostas para a instalação de vinha conhecidos na RDD (Figura 7), inclusive, a prática em crescimento de reconversão dos terraços pós-filoxéricos com a instalação de patamares mecanizáveis sobretudo de 2 bardos de vinha, para a utilização do trator vinhateiro.

Na bacia da Meia Légua, as áreas com sistemas de armação do terreno apresentam, além da vinha, terras aráveis, pomares, olival, ocupação arbustiva e herbácea e outras folhosas. As áreas

sem armação do terreno são áreas urbanas, infraestruturas e equipamentos, ocupação arbustiva e herbácea, áreas florestais, pomares e olivais.



Figura 7 - Sistemas de armação do terreno na bacia hidrográfica da Meia Légua: A) socalcos pré-filoxéricos; B) terraços pós-filoxéricos e patamares com talude em terra; C) vinha ao alto; D) “micropatamares” e muros de suporte em pedra seca de antigos terraços pós-filoxéricos.

Capítulo 2 – Estado Atual dos Conhecimentos

2.1. Movimentos de vertente

São conhecidas diversas classificações de movimentos de vertente, nomeadamente as classificações de Varnes (1958, 1978) e de Hutchinson (1968, 1988). No presente trabalho, optou-se pela utilização da classificação e descrição desenvolvida por R. Dikau, D. Brunsden, L. Schrott e M. L. Ibsen em 1996. Este grupo de investigação europeu baseou-se na classificação da *International Geotechnical Societies UNESCO Working Party on World Landslide Inventory (WP/WLI)* de 1993 (Dikau, 2004b).

Em Portugal destacam-se os trabalhos de Zêzere (1997) e de Rodrigues (1998) como referência quanto à adaptação da terminologia dos movimentos de vertente a Portugal.

Para Dikau (2004b) os movimentos de vertente (*mass movement*) consistem em movimentos em profundidade e para jusante de materiais da vertente sob influência da gravidade. Este processo não requer o transporte dos materiais em canal por ação da água, ar ou gelo, no entanto, estes agentes podem influenciar o processo.

Quanto ao termo deslizamento (*landslide*), o mesmo autor refere que este é utilizado na literatura anglo-saxónica como sinónimo de movimento de vertente. Este termo é genericamente usado para descrever os movimentos de vertente desencadeados por rutura dos materiais face a tensões tangenciais que ocorrem no plano de rutura. Apresentam frequentemente estrias bem como flancos, que indicam a orientação do deslocamento dos materiais. Todavia, os deslizamentos são processos geomorfológicos distintos de outros movimentos de vertente, designadamente, desabamentos, balançamentos, expansão lateral, fluxos ou movimentos complexos.

Os critérios difundidos para a distinção da tipologia dos movimentos de vertente incluem o tipo de mecanismo (como, por exemplo, se é um deslizamento ou um fluxo); o tipo de material afetado (rocha, detritos ou terra); a morfologia do plano de rutura (côncava ou retilínea); o grau de deformação da massa movimentada; o impacto potencial (profundidade, velocidade e volume) e os fatores desencadeantes e condicionantes (Crozier, 2004a).

Varnes (1978) classificou os movimentos de vertente quanto ao tipo e dimensão do material deslocado: a rocha é uma massa dura ou firme intacta *in situ* antes do movimento; o solo ou terra é um agregado de partículas sólidas e fluidos intersticiais e/ou com pelo menos 80% das partículas superiores a 2mm e os detritos são materiais com 20 a 80% das partículas inferiores a 2mm (Zêzere, 2005).

Relativamente à profundidade dos movimentos de vertente é importante salientar que os movimentos são considerados superficiais quando são inferiores a 1,5m; pouco profundos quando atingem entre 1,5 e 5m de profundidade; profundos entre 5 e 20m de profundidade e muito profundos assim que excedem os 20m de profundidade (Zêzere, 2005).

Os movimentos de vertente na RDD mais frequentes são os deslizamentos, os fluxos e os movimentos complexos (Bateira *et al.*, 2011).

2.1.1. Tipologia

Desabamento (*fall*)

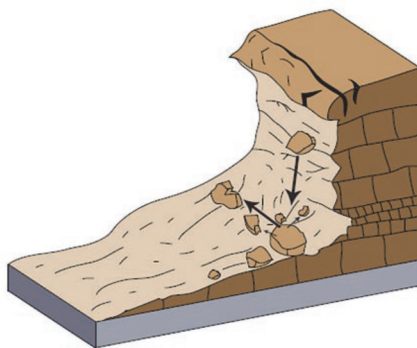


Figura 8 - Esquema de desabamento de rocha (*rockfall*). Extraída de Highland e Bobrowsky (2008).

O desabamento (Figura 8) corresponde à deslocação de materiais a partir de vertentes íngremes (abruptos) onde as tensões tangenciais são nulas ou reduzidas (Dikau, 2004b; UNESCO, 1993).

Os materiais deslocam-se sobretudo pelo ar, por queda, salteação ou rolamento (UNESCO, 1993).

Os desabamentos são influenciados pela orientação e ângulo de inclinação da superfície de fracturação, pelo tamanho, forma e deformação das rochas e pela vegetação (Dikau, 2004b).

Os desabamentos podem ser rochosos, de detritos ou de solo e a geometria de rutura pode ser planar, em cunha, em escadaria ou vertical (Zêzere, 2005).

Estes movimentos desenvolvem-se inicialmente com a “criação de fendas com individualização de blocos (ação da pressão associada à congelação-degelo da água nos vazios e fissuras”, de seguida, desenvolve-se a “ação mecânica das raízes” e a “erosão diferencial”). Posteriormente processa-se o “alargamento das fendas e concentração das tensões na secção da rocha competente sem suporte basal” e gera-se a queda dos materiais por rutura (*flexotração*) (Zêzere, 2005, p. 42).

Balançamento (*topple*)

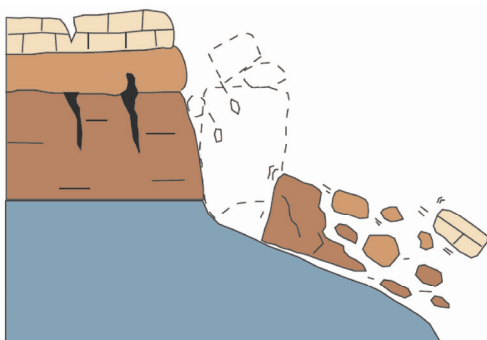


Figura 9 - Esquema de balançamento (topple). Extraída de Highland e Bobrowsky (2008).

O balançamento (Figura 9) consiste numa rotação de uma massa de rocha, de detritos ou de solo para jusante do centro de gravidade da massa afetada, em afloramentos rochosos ou vertentes escarpadas (Dikau, 2004b; UNESCO, 1993).

Os processos responsáveis pelos balançamentos são a “força da gravidade”, a “força lateral exercida por unidades adjacentes” e a “força lateral exercida pela água presente em diáclases e fraturas da rocha” (Zêzere, 2005, p. 42).

Estes movimentos desencadeiam-se por “erosão basal do substrato que os sustenta ou mecanismos de meteorização química ou mecânica” (Bateira *et al.*, 2011, p. 26).

Deslizamento (*slide*)

O termo deslizamento é usado para movimentos de materiais (rocha, detritos ou solo) ao longo de planos de rutura ou superfícies com intensa deformação tangencial (Dikau, 2004b; UNESCO, 1993). O tipo de rutura tangencial e o tipo de material afetado são os critérios adotados na subdivisão da classificação dos deslizamentos.

- Deslizamento rotacional (*rotational slide/slump*)

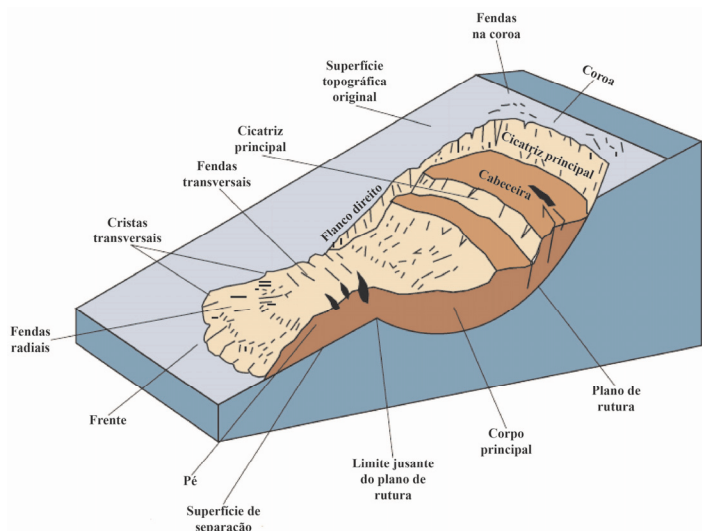


Figura 10 - Esquema de deslizamento rotacional (*rotational slide/slump*). Adaptada de Highland e Bobrowsky (2008).

Estes deslizamentos (Figura 10) ocorrem segundo um movimento rotacional sob uma superfície de ruptura circular ou em forma de “colher” (Dikau, 2004b). Estes deslizamentos diferem quanto ao grau de desintegração dos materiais deslizados e quanto às características de deposição no sopé (Dikau, 2004b).

Varnes (1978) definiu deslizamento rotacional simples como sendo um movimento de rotação em torno de um eixo paralelo à inclinação da superfície topográfica, envolvendo o deslizamento ao longo de uma superfície de ruptura côncava visível ou inferida (Dikau, 2004b). Estes deslizamentos apresentam um pequeno grau de deformação interna dos materiais, embora por vezes a movimentação dos materiais promova a sua liquefação e desenvolvem-se em meios comumente homogêneos e isotrópicos (Dikau, 2004b; Zêzere, 2005).

O movimento inicia-se com a fracturação associada à rotação dos materiais, com abatimento a montante e posterior movimento até ao sopé do plano de ruptura (Dikau, 2004b).

Os materiais deslizados são normalmente compostos por texturas finas, logo são, materiais coesos, como argilas consolidadas (Dikau, 2004b). No entanto, quando saturados, os materiais argilosos perdem a coesão e consequentemente tornam-se mais instáveis.

- Deslizamento translacional (*translational slide*)

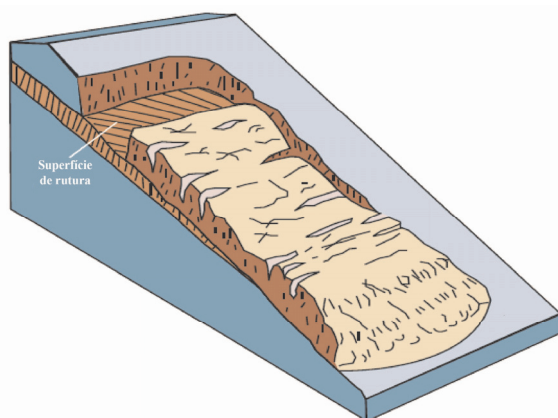


Figura 11 - Esquema de deslizamento translacional (*translational slide*). Adaptada de Highland e Bobrowsky (2008).

Os deslizamentos translacionais (Figura 11) caracterizam-se por um movimento de fracturação não circular que envolve um movimento translativo sob uma superfície plana inclinada (Dikau, 2004b).

Estes deslizamentos ocorrem em superfícies com intensa deformação interna dos materiais, dependem do declive da vertente e desenvolvem-se rapidamente (Dikau, 2004b).

Os deslizamentos translacionais subdividem-se de acordo com o plano de rutura: deslizamentos translacionais com rutura compósita e deslizamentos translacionais com rutura planar (Zêzere, 2005).

Conforme Zêzere (2005, pp. 43 - 44), os deslizamentos translacionais com rutura compósita podem apresentar uma “forma circular ou planar, com forte inclinação, a montante” ou uma “forma planar, com inclinação reduzida, a jusante”. Segundo o autor, estes deslizamentos apresentam uma “forte distorção interna dos materiais instabilizados, formação de fossos e contraescarpados”.

Relativamente ao tipo de material, estes deslizamentos são denominados por *block slide* quando o tipo de material é rocha ou detritos em bloco e *slab slide*, quando o tipo de material é solo em bloco.

Os deslizamentos translacionais com rutura planar processam-se em meios anisotrópicos e são deslizamentos estruturalmente controlados, isto é, “o plano de rutura desenvolve-se ao longo de superfícies de fraqueza marcadas por uma resistência ao corte reduzida, como falhas, planos de estratificação, diáclases, ou o contacto entre uma cobertura detrítica e o substrato rochoso”(Zêzere, 2005, p. 44). Os materiais são deslocados além dos limites do plano de rutura.

Estes deslizamentos subdividem-se igualmente em função do tipo de material afetado em *rock slide* (deslizamento de rocha), *debris slide* (deslizamento de detritos) e *mudslide* (deslizamento de terra ou lamacentos) (Dikau, 2004b).

Os movimentos de vertente registados na bacia hidrográfica da ribeira da Meia Légua foram considerados deslizamentos translacionais de terra com rutura planar. Este tipo de deslizamentos são lentos (movem-se cerca de 1 – 25m por ano e em eventos extremos, centenas de metros por dia) e deslocam-se em planos de rutura descontínuos em áreas com texturas especialmente silto-argilosas (Dikau, 2004b; Zêzere, 2005).

A morfologia característica destes deslizamentos é a seguinte: “área de rutura; sector de transporte com forma em canal; área de acumulação; forma em língua com frente arredondada; perfil longitudinal sinusoidal (côncavo a montante, convexo a jusante); orlas laterais a flanquear a área afetada” (Zêzere, 2005, pp. 44 - 45) (Figura 10).

Os deslizamentos de terra ou lamacentos (*mudslides*) são movimentos sazonais porque desenvolvem-se nos meses com maiores quantitativos de precipitação. Assim sendo, a precipitação é o principal fator desencadeante destes movimentos de vertente por saturação do solo (os deslizamentos ocorrem quando os poros atingem o ponto de retenção de água suficiente para provocar o movimento de vertente) (Dikau, 2004b).

Expansão lateral (*lateral spreading*)

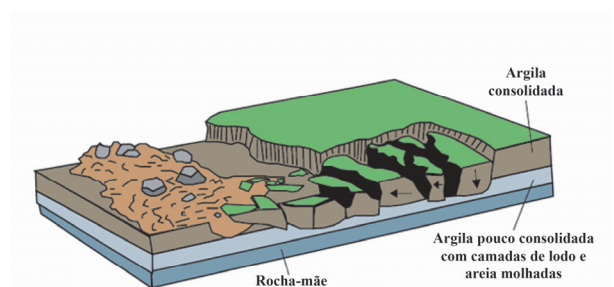


Figura 12 - Esquema de expansão lateral (*lateral spreading*). Adaptada de Highland e Bobrowsky (2008).

A expansão lateral (Figura 12) consiste num movimento de extensão lateral de uma rocha coesa ou massa de solo, concertada com uma subsidência geral no material mais brando subjacente, por liquefação ou fluxo (Dikau, 2004b; UNESCO, 1993). Na expansão lateral não se identificam ruturas basais bem definidas (Zêzere, 2005).

A expansão lateral em rocha (*rock spreading*) caracteriza-se por um “movimento muito lento, resultante de deformações visco-plásticas profundas” e a expansão lateral em solo (*soil/debris spreading*), caracteriza-se por um “movimento muito rápido, associado ao colapso, por liquefação, de uma camada de solo a uma certa profundidade, seguida de assentamento ou da rutura do material sobrejacente” (Zêzere, 2005, p. 45).

Fluxo (*flow*)

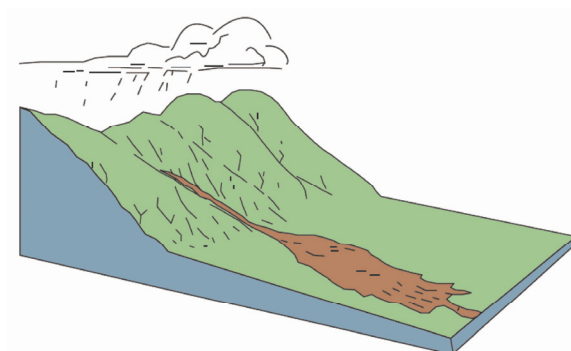


Figura 13 - Esquema de fluxo de detritos (*debris flow*). Extraída de Highland e Bobrowsky (2008).

Os fluxos (Figura 13) são movimentos de partículas envolvidas numa massa que assemelha-se a um fluido viscoso e que desloca-se continuamente sob uma superfície de elevada tensão tangencial efêmera e mal preservada (Dikau, 2004b; UNESCO, 1993).

Estes movimentos envolvem rochas bastante fraturadas e depósitos de textura fina e de pequena granulometria (Dikau, 2004b).

Os materiais que constituem a massa afetada sofrem de uma intensa deformação por tensão interna diferencial entre as partículas e velocidades diferenciadas (Dikau, 2004b).

Tal como os deslizamentos, os fluxos subdividem-se em diversos subtipos: fluxo de rocha (*rock flow*), fluxo de detritos (*debris flow*) e fluxo de terra ou lamacento (*soil flow/mudflow*) (Dikau, 2004b).

Os fluxos têm geralmente início como deslizamento que transforma-se em fluxo por fluidificação do material afetado com o aumento do volume ou liquefação – “quebra na resistência mecânica provocada por um aumento súbito da pressão da água nos vazios” - da massa em movimento (Zêzere, 2005, p. 46).

Estes movimentos de vertente são provocados por precipitações intensas de curta duração, na sequência de períodos longos de precipitação.

Complexo (*complex*)

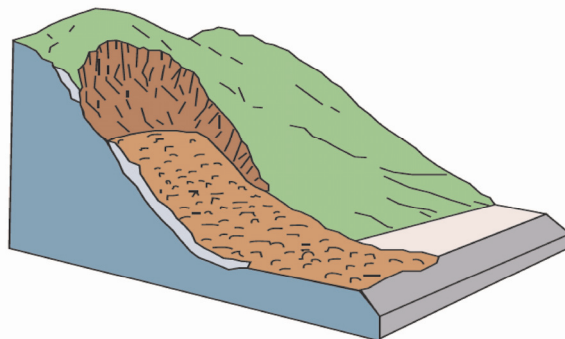


Figura 14 - Esquema de avalanche de detritos (*debris avalanche*). Extraída de Highland e Bobrowsky (2008).

Os movimentos complexos (Figura 14) resultam da combinação de diversos processos de movimentos de vertente e ocorrem sempre que o tipo de mecanismo inicial se altera à medida que a massa desloca-se para jusante (Dikau, 2004b).

São portanto, movimentos sucessivos que congregam mais do que um tipo de movimento de vertente, como avalanches de rocha (*rock avalanche*) ou fluxo deslizante (*flow slides*) (Dikau, 2004b).

2.1.2. Fatores desencadeantes e condicionantes

Os fatores desencadeantes e condicionantes dos movimentos de vertente são fatores de instabilidade permanentes e sistêmicos e são característicos da área em estudo.

Os processos de instabilidade geomorfológica podem ser desencadeados por atividade tectónica, erosão das vertentes, processos atmosféricos e hidrológicos, desflorestação/ausência de coberto vegetal ou por intervenção antrópica nas vertentes (Crozier, 2004a).

Os principais fatores desencadeantes dos movimentos de vertente na RDD são os processos atmosféricos e hidrológicos, designadamente a precipitação. A concentração do fluxo de água no solo e subsolo por elevada intensidade e duração de precipitação aumenta a tensão tangencial na vertente e pode desencadear processos de instabilidade por saturação do solo (Bateira *et al.*, 2011).

Os fatores condicionantes podem ser classificados como fatores de predisposição e fatores preparatórios (dinâmicos).

Os fatores de predisposição são pré-condições estáticas e inerentes a características que não influenciam por si só a estabilidade mas, condicionam a ação dos fatores preparatórios (fatores topográficos como os declive das vertentes e o tipo de materiais) (Crozier, 2004b).

Os fatores preparatórios são fatores dinâmicos pela definição da redução da estabilidade de vertentes ao longo do tempo sem desencadear a ocorrência do movimento de vertente (Crozier, 2004b).

Os fatores dinâmicos consistem em processos geomorfológicos (erosão dos solos e perda de coesão) ou antrópicos (construção de sistemas de armação do terreno e de sistemas de drenagem inadequados) (Crozier, 2004b).

Os fatores condicionantes utilizados na presente dissertação correspondem a fatores topográficos e a parâmetros geofísicos da bacia hidrográfica da Meia Léguas. Os fatores topográficos são os declives, áreas de contribuição, o Índice Topográfico de Humidade, alturas estimadas dos terraços, sistemas de armação do terreno, exposição de vertentes e curvatura de vertentes. Os parâmetros geofísicos são a textura do solo, a resistência do solo à penetração, a condutividade hidráulica, a capacidade de infiltração da água, o peso específico do solo, a coesão do solo, o ângulo de atrito interno e a espessura do solo instável.

2.2. Estabilidade de vertentes

A estabilidade ou instabilidade de vertentes determina a propensão para a vertente passar por processos morfológicos de rutura, particularmente deslizamentos (Crozier, 2004b).

Em qualquer vertente, ocorrem tensões que promovem o movimento de materiais para jusante da superfície topográfica (tensões de cisalhamento (T)) e tensões opostas de resistência ao cisalhamento (t), como a coesão do solo (c') e o ângulo de atrito interno (Φ) (Crozier, 2004b).

A estabilidade de vertentes pode ser avaliada através da razão entre estas tensões para uma superfície de rutura no interior da vertente, fornecendo um *Fator de Segurança* (FS) (Equação 1).

$$FS = \sum t / \sum T \text{ (Equação 1)}$$

Quando as forças de tensão de cisalhamento ou tangenciais (T) são iguais às forças de tensão motoras, de resistência ao cisalhamento (t), o FS = 1 e a vertente encontra-se no limite da estabilidade; quando FS < 1, a vertente está instável e quando FS > 1, a vertente é estável (Dikau, 2004a). Alguns autores, por segurança, usam o valor de FS de 1,2 como referência da estabilidade.

Estas tensões atuantes na superfície potencial de rutura foram originalmente apresentadas por Coulomb (1776) (Dikau, 2004a). Mohr-Coulomb desenvolveu uma equação que reproduz matematicamente a resistência ao cisalhamento (S) de uma vertente, de acordo com um *Modelo Bidimensional do Talude Infinito* (Equação 2).

O *Modelo do Talude Infinito* considera uma massa (ou bloco) homogênea de espessura uniforme em que o peso do material (y) (resultado do produto entre a massa (m) e a força da gravidade (g)) atua verticalmente ao longo da superfície de ruptura potencial, contribuindo para o movimento de vertente, enquanto a força normal (σ) atua perpendicularmente à superfície de ruptura potencial (Vieira, 2007; Teixeira, 2012).

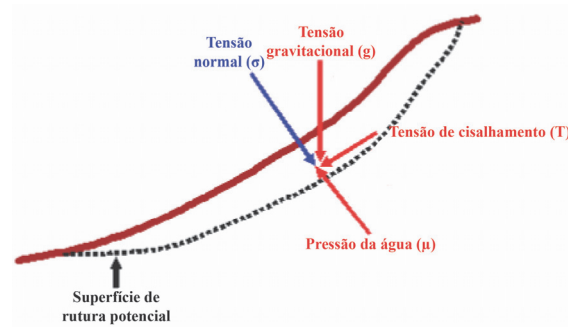


Figura 15 - Esquema das tensões que atuam na superfície potencial de ruptura. Adaptada de Selby (1993), in Vieira (2007).

Sucintamente, a tensão gravitacional (g), a tensão de cisalhamento (T) e a pressão intersticial (μ) representam as tensões com potencial de instabilidade, enquanto a tensão normal (σ) controla a estabilidade por resistência à ruptura (Figura 15).

$$S = c + \sigma \tan \Phi \text{ (Equação 2)}$$

Em que:

S = resistência máxima ao cisalhamento (KN/m² ou KPa);

c = coesão do solo (KPa);

σ = tensão normal total da superfície de ruptura (KPa);

Φ = ângulo de atrito interno do solo (°).

Posteriormente Terzaghi (1925) publicou o conceito fundamental da tensão efetiva considerando a força exercida pela pressão intersticial (μ): $\sigma' = \sigma - \mu$ (Dikau, 2004a). Assim, a tensão normal é expressa como tensão normal efetiva (σ'):

$$S = c' + \sigma' \tan \Phi' \text{ (Equação 3)}$$

Em que: c' = coesão efetiva e Φ' = ângulo de atrito interno efetivo.

O FS então pode ser expresso do seguinte modo:

$$FS = c' + \sigma' \tan \Phi' / S \text{ (Equação 4)}$$

Em que:

$$\sigma' = y z \cos^2 \beta;$$

$$S = y z \cos \beta \sin \beta.$$

O parâmetro y representa o peso volumétrico natural do solo e o parâmetro z a espessura do solo.

Conforme Vieira (2007, p. 19), em função “da impossibilidade de obtenção da espessura do solo perpendicularmente à superfície, essa pode ser calculada por meio de medidas verticais do bloco (z), considerando o paralelogramo ABCD e o retângulo AEFD como similares em área” (Figura 16).

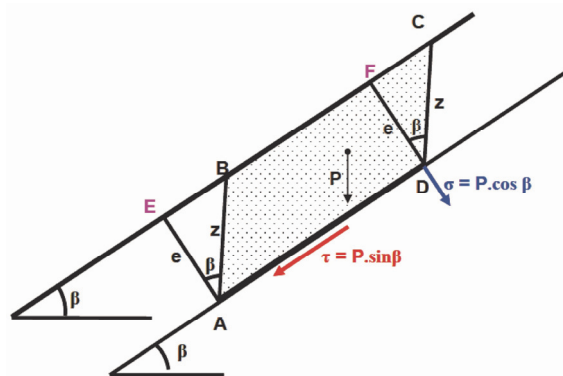


Figura 16 - Esquema representativo da obtenção da espessura do solo (z) mediante ABCD ou AEFD. β = ângulos de EAB e de FDC; $\cos \beta = e / z$; $e = z \cos \beta$. Adaptada de Selby (1993), in de Vieira (2007).

2.3. Avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente

2.3.1. Conceitos

Os conceitos e terminologia para a avaliação de riscos geomorfológicos, designadamente a análise da perigosidade e da suscetibilidade geomorfológicas do território português, padecem de dificuldades de consolidação e de estabilização (Zêzere, 2005).

Contudo existe consenso em torno da “probabilidade de ocorrência de um fenómeno natural indesejado” e da “probabilidade de ocorrência de consequências indesejadas decorrentes da atividade de um fenómeno natural particular” (Zêzere, 2005, p. 81).

A terminologia empregue nesta dissertação baseia-se na terminologia internacional sistematizada por Varnes e pela *Internacional Association of Engineering Geology Commission on Landslides and Other Mass Movements on Slopes* da UNESCO (1984) adaptada por Zêzere (2005, pp. 81 - 82):

O conceito de **perigosidade natural (P)** (*natural hazard*) consiste na “probabilidade de ocorrência de um fenómeno potencialmente destruidor, num determinado período de tempo e numa dada área.”

A **suscetibilidade (S)** (*susceptibility*) é percebida como a “probabilidade espacial de ocorrência de um determinado fenómeno numa dada área com base nos fatores condicionantes do terreno, independentemente do seu período de recorrência”.

A **vulnerabilidade (V)** (*vulnerability*) é o “grau de perda de um elemento ou conjunto de elementos em risco, em resultado da ocorrência de um fenómeno natural de determinada magnitude” e é expressa segundo uma escala de 0 (ausência de perda) a 1 (perda total).

A probabilidade de ocorrência de um processo (ou ação) com determinada severidade implica consequências sobre elementos expostos que estando em risco traduzem-se em **elementos em risco (E)** (*elements at risk*). Estes elementos expostos podem ser expressos em danos corporais, materiais e funcionais (diretos ou indiretos).

O **risco específico (Re)** (*specific risk*) é o “produto da perigosidade pela vulnerabilidade de um elemento ou conjunto de elementos em risco” e o **risco total (Rt)** (*total risk*) corresponde ao “número de mortos e feridos expectáveis e prejuízos materiais diretos e indiretos devidos a um fenómeno natural particular”.

Assim sendo, sinteticamente, a expressão matemática do Rt é:

$$R_t = E \cdot R_e = E \cdot (P \cdot V) \text{ (Equação 5)}$$

2.3.2. Tipologia dos modelos

Os métodos de avaliação da suscetibilidade geomorfológica estabelecem a diferenciação espacial da suscetibilidade a movimentos de vertente com base na análise do território em estudo. Os métodos conhecidos podem ser divididos em métodos de Cartografia Direta e em métodos de Cartografia Indireta.

Os métodos de Cartografia Direta são métodos de avaliação qualitativa da suscetibilidade e baseiam-se na distribuição dos movimentos de vertente registados e na análise das causas da instabilidade - métodos geomorfológicos.

Os mapas estão diretamente relacionados com mapas geomorfológicos de detalhe elaborados pelo investigador no levantamento de campo (Panizza, 1975, in Aleotti & Chowdhury, 1999).

Assim sendo, estes métodos exigem a experiência e conhecimento de campo do investigador e como tal, são métodos com um elevado grau de subjetividade (Zêzere, 2005).

Os métodos de Cartografia Indireta são maioritariamente quantitativos com exceção dos métodos heurísticos ou de indexação, realizados pela atribuição subjetiva de *scores* a um conjunto de mapas dos fatores condicionantes da instabilidade, que são somados ou multiplicados de modo a obter valores de suscetibilidade para cada unidade de terreno (exemplo: Análise Multicritério) (Zêzere, 2005).

Os métodos quantitativos representam o grau da instabilidade - métodos de inventário das ocorrências, modelos estatísticos e modelos geotécnicos.

As metodologias de Cartografia Indireta de base estatística fundamentam-se na ponderação das causas da instabilidade a partir da análise entre os fatores condicionantes e a distribuição espacial dos movimentos de vertente (Zêzere, 2005).

A aplicação destes métodos “implica a definição prévia de unidades cartográficas no território, que podem ser: unidades matriciais, unidades de condição única (domínios homogêneos), unidades geológico-geomorfológicas, unidades morfo-hidrológicas, ou unidades topográficas” (Zêzere, 2005, p. 86).

Com a implementação destes modelos através de *softwares* SIG, os processamentos tornaram-se rápidos, mais simples e permitiram a análise espacial em gabinete.

Inventário das ocorrências

Os inventários das ocorrências de instabilidade baseiam-se no registo com uma ficha-tipo dos movimentos de vertente: localização geográfica, tipologia, características do movimento, causas prováveis e os critérios morfológicos, pedológicos e de ocupação do solo (Zêzere, 2005).

O registo pode ser efetuado mediante o levantamento no terreno pelo investigador e/ou através de métodos secundários de aquisição de dados, por exemplo, a fotointerpretação de fotografias aéreas ou de imagens de satélite e a análise de fontes históricas, como fontes documentais.

Modelos estatísticos

A abordagem estatística compara a distribuição espacial da instabilidade passada e presente com os fatores condicionantes selecionados segundo funções paramétricas empíricas e permite cartografar a suscetibilidade para áreas onde não foram registradas ocorrências mas que possuem as condições necessárias para a ocorrência de processos de instabilidade futuros (Aleotti & Chowdhury, 1999).

A seleção dos parâmetros utilizados é fulcral e o investigador pode analisar a capacidade preditiva de cada fator condicionante para optar pelo cenário com melhor precisão considerando o menor número de fatores (técnica de análise sensitiva).

Os modelos estatísticos subdividem-se em modelos bivariados e em modelos multivariados.

A análise estatística bivariada baseia-se na comparação individual de cada fator condicionante com os inventários de ocorrências e na atribuição das ponderações fundamentando-se nas classes com maior potencial de deslizamento (exemplo: Valor Informativo) (Aleotti & Chowdhury, 1999).

A análise multivariada estabelece relações entre mais de dois atributos ou características de um mesmo objeto, ou seja, estes modelos atribuem a ponderação das classes de cada variável consoante a relação espacial entre os parâmetros escolhidos com a distribuição espacial das ocorrências (exemplo: Regressão Logística).

Modelos geotécnicos

Os modelos geotécnicos são modelos determinísticos ou probabilísticos que se fundamentam nas características geométricas, físicas e hidrogeológicas das vertentes e classificam a suscetibilidade a partir de valores mensuráveis (exemplo: Fator de Segurança) (Zêzere, 2005).

Os modelos determinísticos firmam-se nas leis físicas e mecânicas das vertentes para o cálculo da estabilidade, enquanto os modelos probabilísticos determinam a probabilidade de ocorrência de movimentos de vertente consoante os parâmetros físicos e hidrológicos da área em análise.

Até agora, estes modelos matemáticos de base física têm sido programados segundo a atribuição de valores homogêneos para a área em estudo. Contudo, nos últimos anos têm surgido

propostas de algoritmos que permitem a introdução por parte do investigador da variação espacial dos parâmetros.

2.3.3. Modelos utilizados

A. Valor Informativo

O método do Valor Informativo (*information value method*) é uma técnica desenvolvida por Yan (1988) e por Yin e Yan (1988) e aplicada inicialmente em Portugal por Zêzere (1997) para “estimar quantitativamente a contribuição relativa dos vários fatores considerados na análise da distribuição das manifestações de instabilidade” (Zêzere, 1997, p. 488).

Este método estatístico “pressupõe a definição prévia de unidades de terreno e a tomada em consideração de um conjunto de fatores de instabilidade” (Zêzere, 1997, p. 513).

Os *scores* do Valor Informativo são determinados para cada um dos fatores condicionantes a partir da seguinte relação (Yin e Yan, 1988, in Zêzere, 1997):

$$I_i = \log((S_i / N_i) / (S / N)) \text{ (Equação 6)}$$

Em que:

I_i = Valor Informativo da variável i ;

S_i = número de unidades de terreno com movimentos de tipo y e com a presença da variável x_i ;

N_i = número de unidades de terreno com a presença da variável x_i ;

S = número total de unidades de terreno com movimentos de tipo y ;

N = número total de unidades de terreno.

Sempre que o Valor Informativo (I_i) for negativo, a variável explicativa não é determinante no desenvolvimento do fenómeno que está a ser modelado. Pelo contrário, quando o I_i é positivo a variável explicativa condiciona o fenómeno em estudo e quanto maior o valor de I_i , maior é a influência da variável (Yan, 1988, in Zêzere, 1997).

O Valor Informativo total de uma unidade de terreno (j) é determinado a partir da seguinte expressão (Yin e Yan, 1988, in Zêzere, 1997):

$$I_j = \sum_{i=1}^m X_{ji} I_i \text{ (Equação 7)}$$

Em que:

m = número de variáveis;

X_{ji} = atribui-se o valor 0 quando a variável está ausente na unidade de terreno e 1 quando a variável está presente na unidade de terreno.

Assim, a suscetibilidade das unidades matriciais de terreno à ocorrência do fenómeno em estudo, varia de acordo com o respetivo Valor Informativo total (I_j) (Zêzere, 1997, p. 514).

B. Regressão Logística

A Regressão Logística (*logistic regression*) é uma técnica de análise de dados que descreve a relação entre uma variável resposta dicotómica (Y), codificada entre 1 e 0 conforme a presença ou ausência do fenómeno em questão, respetivamente, e n variáveis explicativas contínuas ou categóricas (x₁, x₂, ..., x_n) (Das *et al.*, 2010; Hosmer & Lemeshow, 2000).

A Regressão Logística permite, assim, ajustar um modelo para estimar a probabilidade de ocorrência da variável dependente binária (p = Pr(Y=1)) segundo a transformação logística (modelo *Logit*) e os parâmetros são estimados segundo o método *likelihood maximization* (Das *et al.*, 2010; Süzen & Doyuran, 2004).

Numa Regressão Logística binária o valor esperado Y é igual a (Das *et al.*, 2010):

$$p(Y) = 1 / 1 + \exp(- (\alpha + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n)) \text{ (Equação 8)}$$

Transformação logística (*Logit*):

$$\text{Logit}(\pi) = \log(\text{odds}) = \log(\pi/(1 - \pi)) = \alpha + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n \text{ (Equação 9)}$$

Em que:

p = probabilidade de ocorrência;

Y/i = variável dependente;

exp = exponencial;

α = constante do modelo;

β₁...β_n = coeficientes de regressão;

x₁...x_n = variáveis independentes ou explicativas;

log = logaritmo de base natural.

C. SHALSTAB

O modelo SHALSTAB – *SH*allow *Land*slide *ST*ability – é um modelo matemático determinístico (baseado no conceito *steady-state*) desenvolvido na década de 90 (Dietrich *et al.*, 1995; Dietrich *et al.*, 1993) e implementado na costa oeste dos Estados Unidos (Montgomery *et al.*, 1998; Montgomery & Dietrich, 1994). Este modelo permite determinar a probabilidade de ocorrência espacial (ou suscetibilidade) à ocorrência de deslizamentos translacionais.

O SHALSTAB resulta da combinação entre dois modelos, um hidrológico e outro de estabilidade de vertentes. O modelo hidrológico fundamenta-se no modelo *TOPOG* (O'Loughlin, 1986) (Equação 10 e Figura 17).

Este modelo considera que a precipitação (Q) torna-se um fluxo sub-superficial constante e, assim sendo, o modelo permite mapear o padrão espacial da condição de saturação do solo em equilíbrio (Índice de Humidade (W)) com base na relação entre as áreas de contribuição, a transmissividade do solo e o declive da vertente (Montgomery & Dietrich, 1994).

$$W = (Q/T) (a/b) \text{ sen}\theta \text{ (Equação 10)}$$

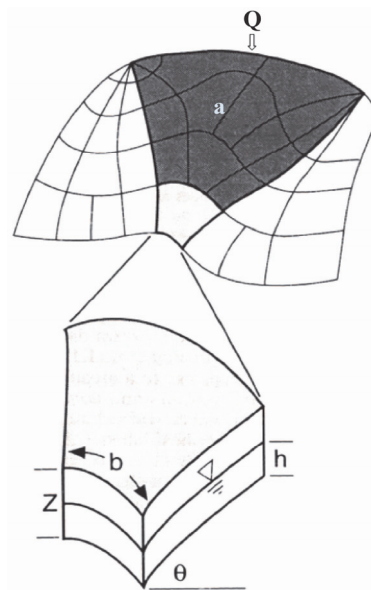


Figura 17 - Elementos topográficos considerados pelo modelo TOPOG de O'Loughlin (1986). Adaptada de David R. Montgomery & Dietrich (1994).

Em que:

Q = intensidade da precipitação (mm);

T = transmissividade do solo saturado (m²/dia);

a = área de contribuição a montante (m^2);
 b = comprimento da unidade de terreno (m);
 θ = declive da vertente ($^\circ$).

O Índice de Humidade (W) também pode ser calculado em função da razão entre a altura da coluna de água acima do plano de rutura (h) e a espessura de solo instável (z), considerando o fluxo de água inicial (q):

$$q = v S \text{ (Equação 11)}$$

Em que:

v = velocidade;
 S = área da secção transversal saturada.

De acordo com a *Lei de Darcy*, a velocidade do fluxo (v) é o produto entre a condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) e o gradiente hidráulico (i). O gradiente hidráulico (i) consiste na razão entre a variação do potencial total da carga gravitacional (ou de elevação) entre dois pontos (ΔH_{total}) e o comprimento (L), que é igual ao $\sin\theta$:

$$v = K_{sat} \sin\theta \text{ (Equação 12)}$$

A área de secção transversal saturada (S) é o produto entre a altura da coluna de água acima do plano de rutura (h) e $\cos\theta$. Portanto, o fluxo de água (q) resulta na seguinte equação:

$$q = K_{sat} \sin\theta h \cos\theta \text{ (Equação 13)}$$

Segundo Montgomery & Dietrich (1994), em *steady-state*, o produto da precipitação efetiva (Q) pela área de contribuição a montante (a), resulta na quantidade de escoamento (*runnoff*) com um determinado comprimento (b):

$$Q a = K_{sat} \sin\theta h \cos\theta b \text{ (Equação 14)}$$

A transmissividade (T) resulta do produto entre a condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) e a espessura do solo (e) ($e = z \cos\theta$). Este parâmetro pode ser calculado com a seguinte expressão (Equação 15):

$$T = K_{sat} z \cos\theta \text{ (Equação 15)}$$

Logo,

$$T b \sin\theta = K_{sat} z \cos\theta \sin\theta b \text{ (Equação 16)}$$

Substituindo as Equações 14 e 15 pela Equação 10, obtém-se W (Equação 17).

$$W = K_{sat} \sin\theta h \cos\theta b / K_{sat} z \cos\theta \sin\theta b \text{ (Equação 17)}$$

Em função de h/z o modelo hidrológico pode ser definido de acordo com a Equação 18.

$$(h/z) = (Q/T) (a/(b \sin\theta)) \text{ (Equação 18)}$$

O segundo modelo, o modelo de estabilidade de vertentes, baseia-se no clássico *Modelo do Talude Infinito* de Mohr-Coulomb (ver o subcapítulo 2.2. Estabilidade de Vertentes). O modelo de estabilidade do SHALSTAB modela a estabilidade de uma determinada porção de solo situada diretamente sobre o afloramento rochoso (Fernandes *et al.*, 2001). A equação de Mohr-Coulomb foi adaptada ao modelo de estabilidade e pode ser obtida com a Equação 19 (Montgomery *et al.*, 1998).

$$p_s g z \sin\theta \cos\theta = c' + (p_s - (h/z) p_w) g z \cos^2\theta \tan\Phi \text{ (Equação 19)}$$

Em que:

p_s = densidade global do solo saturado ou peso específico do solo (Kg/m^3);

g = aceleração gravitacional (m/s^2);

z = espessura do solo (m);

c' = coesão efetiva do solo (KPa);

h = altura da coluna de água acima do plano de rutura (m);

p_w = densidade da água ou peso específico da água (Kg/m^3);

Φ = ângulo de atrito interno do solo ($^\circ$).

A razão h/z é a proporção da coluna de solo saturado e varia entre 0 e 1.

Combinando as Equações 18 e 19 e considerando a precipitação crítica (*steady-state*) (Q_c) necessária para desencadear a instabilidade de vertentes, então (Montgomery *et al.*, 1998):

$$Q_c = (T \sin\theta / (a/b)) [(c'/p_w g z \cos^2\theta \tan\Phi) + (p_s/p_w) (1 - (\tan\theta/\tan\Phi))] \text{ (Equação 20)}$$

A combinação dos modelos para casos em que o parâmetro da coesão (c') não é considerado (exemplo: $c' = 0$) foi representada por Montgomery & Dietrich (1994) com a seguinte equação (Equação 21):

$$Q_c = (T \sin\theta / (a/b)) [(p_s/p_w) (1 - (\tan\theta/\tan\Phi))] \text{ (Equação 21)}$$

Ou,

$$(a/b) = (p_s/p_w) = (1 - (\tan\theta/\tan\Phi)) (T/Q_c) \sin\theta \text{ (Equação 22)}$$

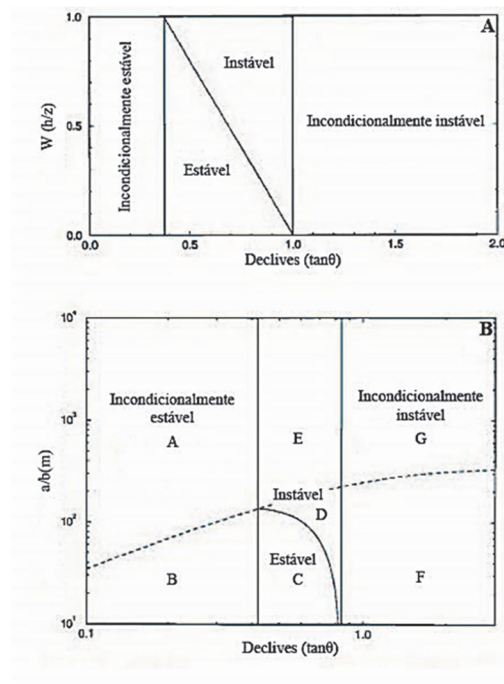


Figura 18 - Condições de estabilidade. A linha tracejada representa o limite de saturação e as letras A à G na figura B representam as condições de estabilidade da Tabela 1. Adaptada de David R. Montgomery & Dietrich (1994).

Montgomery & Dietrich (1994) definiram as seguintes condições (Figura 18 e Tabela 1): incondicionalmente instável, instável, estável e incondicionalmente estável. As vertentes incondicionalmente instáveis são previstas como instáveis mesmo que $W = 0$ ($\tan\theta > \tan\Phi$),

enquanto as vertentes incondicionalmente estáveis são previstas como estáveis mesmo quando $W = 1.0 [\tan\theta \leq \tan\Phi (1 - (p_w/p_s))]$.

Tabela 1 - Classes de estabilidade e de saturação do modelo SHALSTAB. Adaptada de Dietrich & Montgomery (1998), in Vieira (2007).

| Classes | | Condição |
|---------------------|--|---|
| Vertentes estáveis | A) Incondicionalmente Estável e Saturado ("Estável") | $\tan\theta \leq \tan\Phi (1 - (p_s/p_w)); (a/b) > (T/Q) \text{ sen}\theta$ |
| | B) Incondicionalmente Estável e não Saturado (" $> -2,2$ ") | $\tan\theta \leq \tan\Phi (1 - (p_s/p_w)); (a/b) < (T/Q) \text{ sen}\theta$ |
| | C) Estável e não Saturado (" $-2,5 - -2,2$ ") | $(a/b) < (p_s/p_w) (1 - (\tan\theta/\tan\Phi)) (T/Q) \text{ sen}\theta$ $(a/b) < (T/Q) \text{ sen}\theta; \tan\Phi < \tan\theta < \tan\Phi (1 - (p_s/p_w))$ |
| Vertentes instáveis | D) Instável e não Saturado (" $-2,8 - -2,5$ ") | $(a/b) \geq (p_s/p_w) (1 - (\tan\theta/\tan\Phi)) (T/Q) \text{ sen}\theta$ $(a/b) < (T/Q) \text{ sen}\theta; \tan\Phi < \tan\theta < \tan\Phi (1 - (p_s/p_w))$ |
| | E) Instável e Saturado (" $-3,1 - -2,8$ ") | $(a/b) > (p_s/p_w) (1 - (\tan\theta/\tan\Phi)) (T/Q) \text{ sen}\theta$ $(a/b) > (T/Q) \text{ sen}\theta; \tan\Phi < \tan\theta < \tan\Phi (1 - (p_s/p_w))$ |
| | F) Incondicionalmente Instável e não Saturado (" $< -3,1$ ") | $\tan\theta > \tan\Phi; (a/b) < (T/Q) \text{ sen}\theta$ |
| | G) Incondicionalmente Instável e Saturado (" Cronicamente Instável ") | $\tan\theta > \tan\Phi; (a/b) > (T/Q) \text{ sen}\theta$ |

D. Métodos de validação

Dada a impossibilidade de validar os mapas de suscetibilidade posteriormente à sua realização, recentemente diversos autores têm recorrido a diferentes métodos de validação indiretos partindo do pressuposto que os fatores que condicionaram a instabilidade no passado serão os mesmos futuramente (exemplo: Raia *et al.*, 2014)

No presente trabalho foram realizados os seguintes métodos indiretos: determinação de taxas de sucesso, cálculo de curvas ROC e o cálculo de rácios a partir das tabelas de contingência.

A validação das avaliações da suscetibilidade geomorfológica segundo modelos estatísticos implica inicialmente a partição do inventário (base de dados dos movimentos de vertente) de acordo com um critério temporal, espacial ou aleatório (Zêzere, 2005). Optou-se pela partição

aleatória automática do universo de 597 movimentos de vertente (50%): 299 ocorrências foram utilizadas para a modelação e as restantes 298, foram aplicadas na validação dos modelos.

Curva da Taxa de Sucesso

O método de validação da taxa de sucesso valida os cenários de suscetibilidade pelo cruzamento destes com a amostra dos movimentos de vertente utilizados na modelação estatística, permitindo determinar a área abaixo da curva (AAC), que indica a capacidade preditiva dos modelos (Chang-Jo Chung & Fabbri, 2008; Zêzere, 2005).

Vale a pena salientar que quando é utilizado o sub-conjunto dos movimentos de vertente aplicados na validação a metodologia denomina-se por taxa de predição.

As curvas de validação reproduzem a percentagem cumulativa da área abrangida pela amostra de movimentos de vertente (eixo y) relativamente à área de estudo classificada por ordem decrescente de suscetibilidade (área de suscetibilidade, eixo x) (Chang-JoF Chung & Fabbri, 2003). A curva hipotética de validação varia entre 0 e 1 e quanto maior a sua AAC, melhor será a capacidade preditiva do modelo. O valor mínimo elegível de AAC normalmente considerado é 0,5 (50% de previsão) (Pereira, 2009).

A AAC resulta da seguinte fórmula (Pereira, 2009, p. 233):

$$AAC = \sum_{i=1}^n [(L_{si} - L_i) ((a_i + b_i)/2)] \text{ (Equação 23)}$$

Em que:

$(L_{si} - L_i)$ = amplitude da classe;

a_i = valor da ordenada correspondente a L_i ;

b_i = valor da ordenada correspondente a L_{si} .

Curva ROC

A curva ROC é determinada a partir de um teste de diagnóstico quantitativo, que é avaliado com as tabelas de contingência pela comparação relativa da fração de verdadeiros positivos (FVP), da fração de falsos positivos (FFP), da fração de verdadeiros negativos (FVN) e da fração de falsos negativos (FFN)¹ (Braga, 2000).

¹ É importante referir que fração pode ser designada como rácio: rácio de verdadeiros positivos (RVP), rácio de falsos positivos (RFP), rácio de verdadeiros negativos (RVN) e rácio de falsos negativos (RFN).

Segundo a *teoria de detecção do sinal* para dois acontecimentos e duas respostas existem quatro resultados possíveis (Tabela 2) (Braga, 2000).

Tabela 2 - Tabela de contingência 2x2 segundo a teoria de detecção de sinal. Adaptada de Braga (2000).

| Resposta | Acontecimento | |
|----------|---|--|
| | Ruído + Sinal (sn) | Ruído (n) |
| | | |
| Sim (S) | $a = P(S sn)$ (acerto ou verdadeiro positivo) | $b = P(S n)$ (falso alarme ou falso positivo) |
| Não (N) | $c = P(N sn)$ (valor omisso ou falso negativo) | $d = P(N n)$ (verdadeiro negativo) |

A curva ROC baseia-se em duas respostas preditivas que resultam na probabilidade de $a/(a + c)$ (FVP); na razão entre o número de decisões falsas positivas e o número de casos realmente negativos (FFP); na razão entre o número de decisões falsas negativas e o número de casos realmente positivos (FFN) e na probabilidade de $b/(b + d)$ (FVN) (Braga, 2000).

Num teste de diagnóstico as hipóteses podem ser definidas como (Figura 19):

H_0 : presença do fenómeno em questão;

H_1 : ausência do fenómeno em questão.

A representação da curva ROC em termos de diagnóstico dá a probabilidade de aceitar H_0 (Braga, 2000).

O valor de corte, que é definido pelo investigador, delinea a região de rejeição, ou seja, a dimensão dos erros de tipo I e de tipo II (Braga, 2000). A dimensão destes erros varia consoante o valor de corte de acordo com um balanço: à medida que α aumenta, β diminui, e vice-versa (Braga, 2000).

Segundo Braga (2000, p. 12) “a área sombreada à direita do critério de decisão, c , representa a probabilidade de cometer um erro de tipo I, que corresponde à probabilidade de rejeitar H_0 quando H_0 é verdadeira; a área sombreada à esquerda do critério de decisão, c , representa a probabilidade de cometer um erro de tipo II, que corresponde à probabilidade de não rejeitar H_0 quando H_1 é verdadeira” (Figura 19 e Tabela 3).

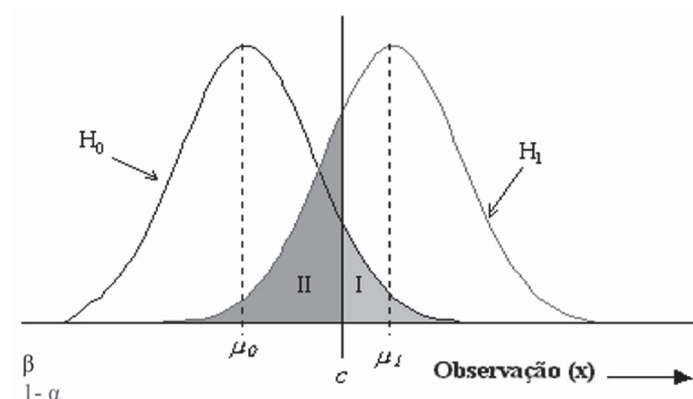


Figura 19 - Representação hipotética dos testes de hipóteses. Adaptada de Braga (2000).

Tabela 3 - Erros do tipo I e II.

| | H ₀ Verdadeira | H ₀ Falsa |
|-------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| Aceitar H ₀ | Decisão correta | Erro tipo II Falso negativo |
| Rejeitar H ₀ | Erro tipo I Falso positivo | Decisão correta |

Se $p\text{-value} > \alpha$: Aceitamos H₀;

Se $p\text{-value} < \alpha$: Rejeitamos H₀ e aceitamos H₁.

No plano unitário, a curva ROC “é uma representação gráfica dos pares sensibilidade ou FVP (ordenadas) e 1- especificidade ou FFP (abscissas), resultantes da variação do valor de corte ao longo de um eixo de decisão, x” (Braga, 2000, p. 29).

Em termos de diagnóstico poder-se-á dizer que a sensibilidade é a capacidade que um teste tem para detetar a ocorrência de movimentos de vertente e a especificidade é a capacidade que o teste tem de excluir os pontos aleatórios não coincidentes com movimentos de vertente.

De acordo com Braga (2000, p. xvi), a área abaixo da curva ROC (AAC) está associada ao poder discriminante do teste de diagnóstico e pode ser determinada segundo “métodos de resolução numérica, tipo regra do trapézio”; “métodos estatísticos: relação com a estatística de Wilcoxon-Mann-Witney” ou com a “estimativa de máxima verosimilhança”.

Tabelas de contingência

As tabelas de contingência foram adaptadas ao fenómeno e metodologias de análise em estudo. As classes preditivas retratam a suscetibilidade, subdividindo-se na classe instável e

estável. Foram então calculados os quatro resultados - verdadeiros positivos (VP); falsos positivos (FP); falsos negativos (FN) e verdadeiros negativos (VN) – pelo cruzamento entre o mapa com as classes de suscetibilidade e as unidades matriciais dos movimentos de vertente.

Após a construção da tabela de contingência, foram calculados índices de diagnóstico que possibilitaram a validação dos modelos (Fawcett, 2006; Kohavi & Provost, 1998; Lewis & Gale, 1994):

$$\text{RVP} = \text{VP} / (\text{VP} + \text{FN}) \text{ (Equação 24)}$$

$$\text{RFP} = \text{FP} / (\text{FP} + \text{VN}) \text{ (Equação 25)}$$

$$\text{ACC} = (\text{VP} + \text{VN}) / (\text{S} + \text{N}) \text{ (Equação 26)}$$

$$\text{PPV} = \text{VP} / (\text{VP} + \text{FP}) \text{ (Equação 27)}$$

$$\text{F1} = 2 ((\text{RVP} \text{ PPV}) / (\text{RVP} + \text{PPV})) \text{ (Equação 28)}$$

Em que:

RVP = rácio de verdadeiros positivos;

RFP = rácio de falsos positivos;

ACC = acurácia ou fiabilidade;

S = área total classificada como instabilizada;

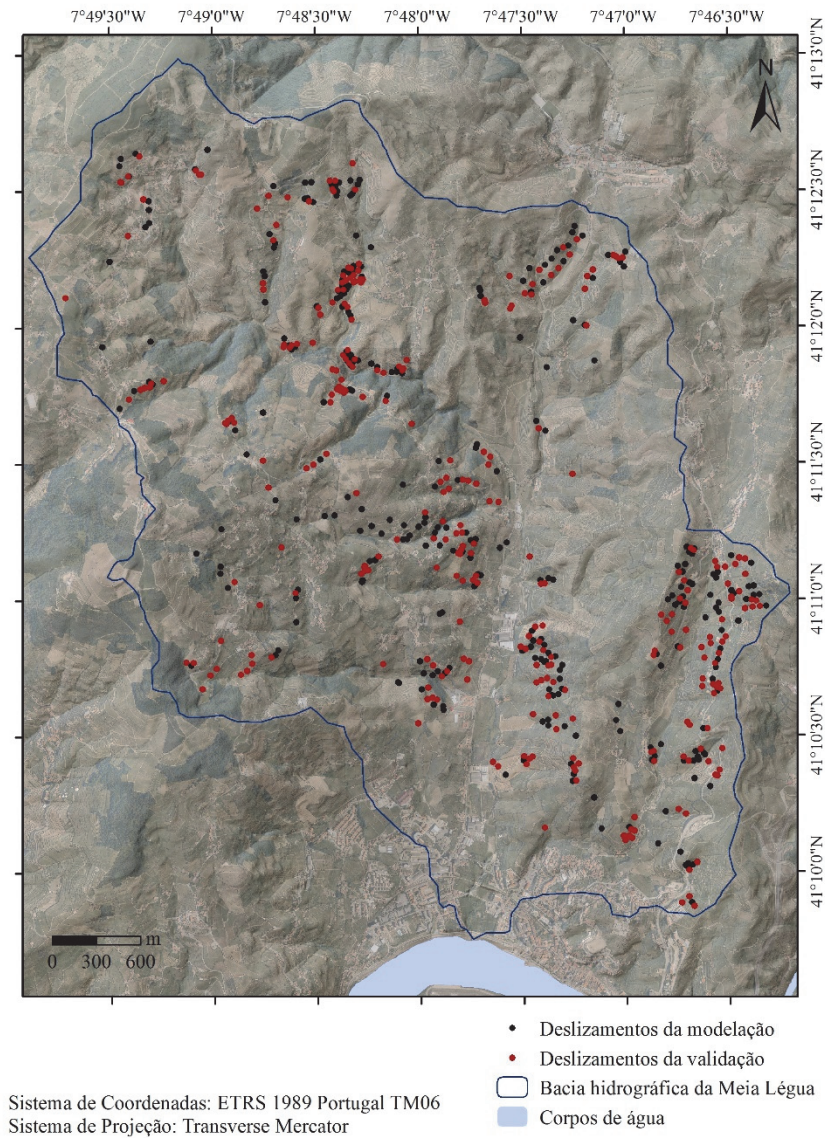
N = área total classificada como não instabilizada;

PPV = precisão ou potencial de deslizamento;

F1 = medição ponderada da precisão de verdadeiros positivos (0 – 1).

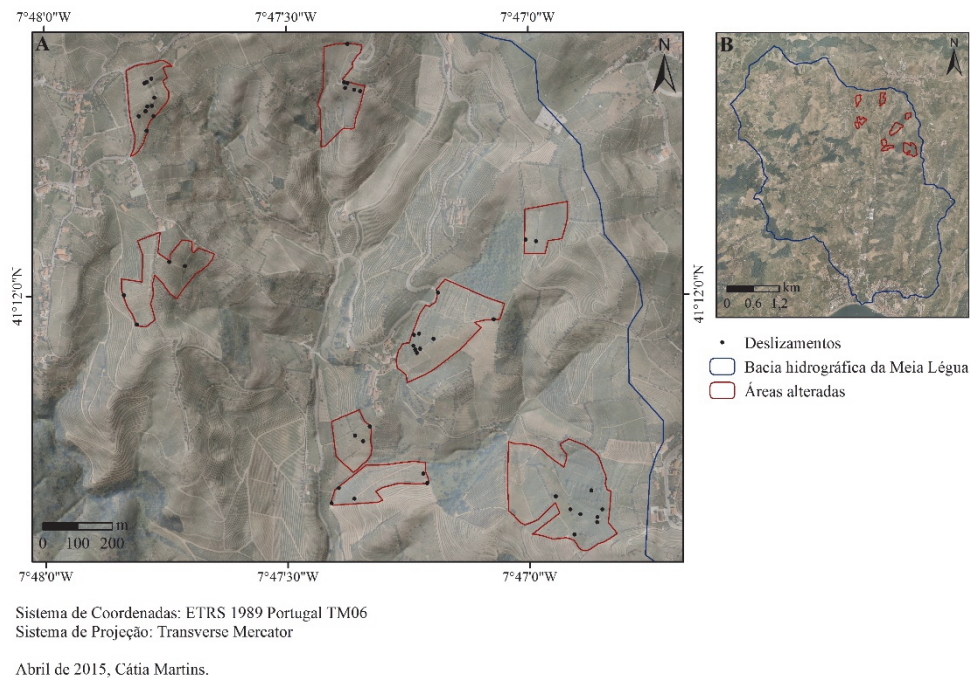
Capítulo 3. Dados

3.1. Inventário



Abril de 2015, Cátia Martins.

Figura 20 - Inventário de movimentos de vertente realizado entre 2004 e 1006. Fonte do inventário: TERRISC. Fonte do mapa: Direção-Geral do Território; IGEOE.



O inventário da instabilidade é utilizado na modelação de base estatística da suscetibilidade a movimentos de vertente e na validação do conjunto de cartografia elaborada tanto nos métodos de base estatística como no método de base física.

Foram utilizados dois inventários, um com o registo de 597 pontos de instabilidade (Figura 20), elaborado pela equipa de investigação do projeto TERRISC entre Janeiro de 2004 e Setembro de 2006, e outro com o registo de 47 pontos de instabilidade (Figura 21), executado em Janeiro de 2015 em áreas que foram sujeitas a alterações no tipo de armação de terreno, que se localizam no Noroeste da bacia da Meia Lúgua.

As áreas alteradas em 2007 consistiam em socacos com muros de pedra em xisto (pós-filoxera) e a partir de 2013 foram reconvertidas em patamares entre os muros com 1 a 2 bardos de vinha e espaçamento entre os bardos para a mecanização dos trabalhos agrícolas. Esta adaptação dos terraços tradicionais à mecanização tem sido uma prática recorrente nos últimos anos na RDD.

Os inventários foram elaborados diretamente no terreno e foram considerados aspetos como a localização geográfica dos movimentos de vertente, o tipo de processo, o tipo de armação do terreno, os fatores condicionantes e o registo fotográfico no caso do inventário de 2015 (Figura 22).

Os inventários foram mapeados inicialmente por pontos para a modelação com o método de Regressão Logística. Estes pontos foram posteriormente convertidos em células matriciais (pixéis) com 2m de resolução espacial (cada pixel representa 4m² de área deslizada) para a modelação através do método do Valor Informativo, bem como, para a validação dos métodos de base estatística e de base física.

É de salientar que as unidades matriciais de terreno aproximam-se mais dos processos de instabilidade em estudo, uma vez que, os deslizamentos translacionais consistem em movimentos de materiais ao longo de planos de rutura e, sendo assim, a análise da instabilidade não se limita a um ponto mas, a uma área deslizada (ver Figura 22).



Figura 22 - Exemplos de instabilidade na bacia hidrográfica da Meia Léguas: A) deslizamento típico da área de estudo associado a queda de muro; B) muro reconstruído.

O inventário do projeto TERRISC na área de estudo era constituído por 734 pontos de instabilidade, localizando 137 pontos em áreas sem armação do terreno. Os 137 pontos foram excluídos na medida em que, os processos de instabilidade em estudo correspondem a movimentos de vertente em áreas com sistemas de armação do terreno para a prática agrícola.

Após a adaptação do inventário do projeto TERRISC ao fenómeno em estudo, restaram 597 movimentos de vertente (Figura 20). Estes 597 pontos de instabilidade consistem em muros caídos ou reconstruídos (recentes ou antigos) apesar de 25% destes se localizarem em áreas onde hoje há patamares com taludes em terra e 20% em áreas de vinha ao alto.

Apesar dos 47 movimentos de vertente do inventário realizado nas áreas alteradas em 2013 (Figura 21) se circunscreverem a áreas de vinha com patamares de talude em terra, 87% dos deslizamentos corresponderam a muros reconstruídos, devido ao novo tipo de armação do terreno, de instalação de patamares com taludes em terra (com espaçamento entre eles para a utilização de técnicas de mecanização) entre os muros tradicionais de pedra em seco nestas áreas.

Para a modelação e validação da suscetibilidade pelos métodos de base estatística, dividiu-se o inventário do projeto TERRISC em dois grupos aleatórios (50%) com a ferramenta *Subset Features* em Geostatistical Analyst Tools do *software* ArcGIS 10. Constituiu-se o grupo de treino ou modelação e outro, de teste ou validação: 299 ocorrências foram utilizadas para a modelação e as restantes 298, foram deixadas para a validação dos métodos.

Os cenários de simulação do SHALSTAB foram validados com base na totalidade do inventário do projeto TERRISC e no inventário de Janeiro de 2015 com o único objetivo de adquirir um indicador de avaliação desta nova metodologia prospetiva uma vez que, o tipo de armação do terreno simulado não corresponde à armação que originou os inventários.

3.2. Fatores topográficos

Os fatores topográficos foram derivados a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE) cuja unidade de terreno é 2m de pixel (4m²), exceto a variável sistemas de armação do terreno, que foi vetorizada manualmente a partir da fotointerpretação de ortofotomapas de 2007 com uma resolução espacial de 0,5m. O MDE foi elaborado através da altimetria à escala 1:25 000 e da rede hidrográfica obtida do projeto TERRISC.

O MDE foi criado com o módulo *Topo to Raster* do *software* ArcGIS 10 (extensão 3D Analyst Tools) pela interpolação de um modelo hidrologicamente correto. Ainda assim, para evitar erros hidrológicos (depressões), que impediriam o cálculo correto da direção de escoamento, utilizou-se a ferramenta *Fill* em Hydrology (extensão 3D Analyst Tools).

Após a correção do MDE e a delimitação da bacia hidrográfica da Meia Légua, elaboraram-se os mapas temáticos com a unidade matricial de 2m de pixel.

Os fatores topográficos derivados foram: declives; áreas de contribuição; Índice Topográfico de Humidade; alturas estimadas dos patamares; exposição de vertentes e curvatura de vertentes. Estes fatores juntamente com os sistemas de armação do terreno constituíram os fatores condicionantes da instabilidade estudada.

No presente trabalho de investigação optou-se pela análise comparativa de dois métodos de cálculo das áreas de contribuição: o método do algoritmo D-Infinity (D_{∞}) de Tarboton D. G. (1997) e o método do algoritmo Multiple Flow Direction (MD8) de Quinn P. *et al.* (1991).

O algoritmo MD8 distribui proporcionalmente o fluxo da água de acordo com o declive das vertentes em cada uma das direções e surgiu como alternativa ao algoritmo Deterministic 8 (D8). O MD8 distribui o fluxo por todas as células de menor valor na sua vizinhança de modo a modelar os fluxos de água divergentes (Holmgren, 1994).

O método do algoritmo D_{∞} é um método mais robusto relativamente aos métodos que o precederam, pois não restringe o fluxo da água a 8 direções possíveis ou a um fluxo distribuído em concordância com o declive. Este algoritmo baseia-se no cálculo de transferência única da direção do fluxo em função da célula de maior declive e considera infinitas direções (Tarboton, 1997).

Esta análise comparativa teve como objetivo analisar possíveis diferenças entre os algoritmos e deste modo concluir qual o método que representa melhor os processos de instabilidade registados na bacia hidrográfica da Meia Léguas.

Para a apresentação e discussão de cada um dos fatores topográficos seguidamente foi feita uma análise estatística: frequência relativa de cada classe e a frequência relativa de área deslizada por classe (Figura 24).

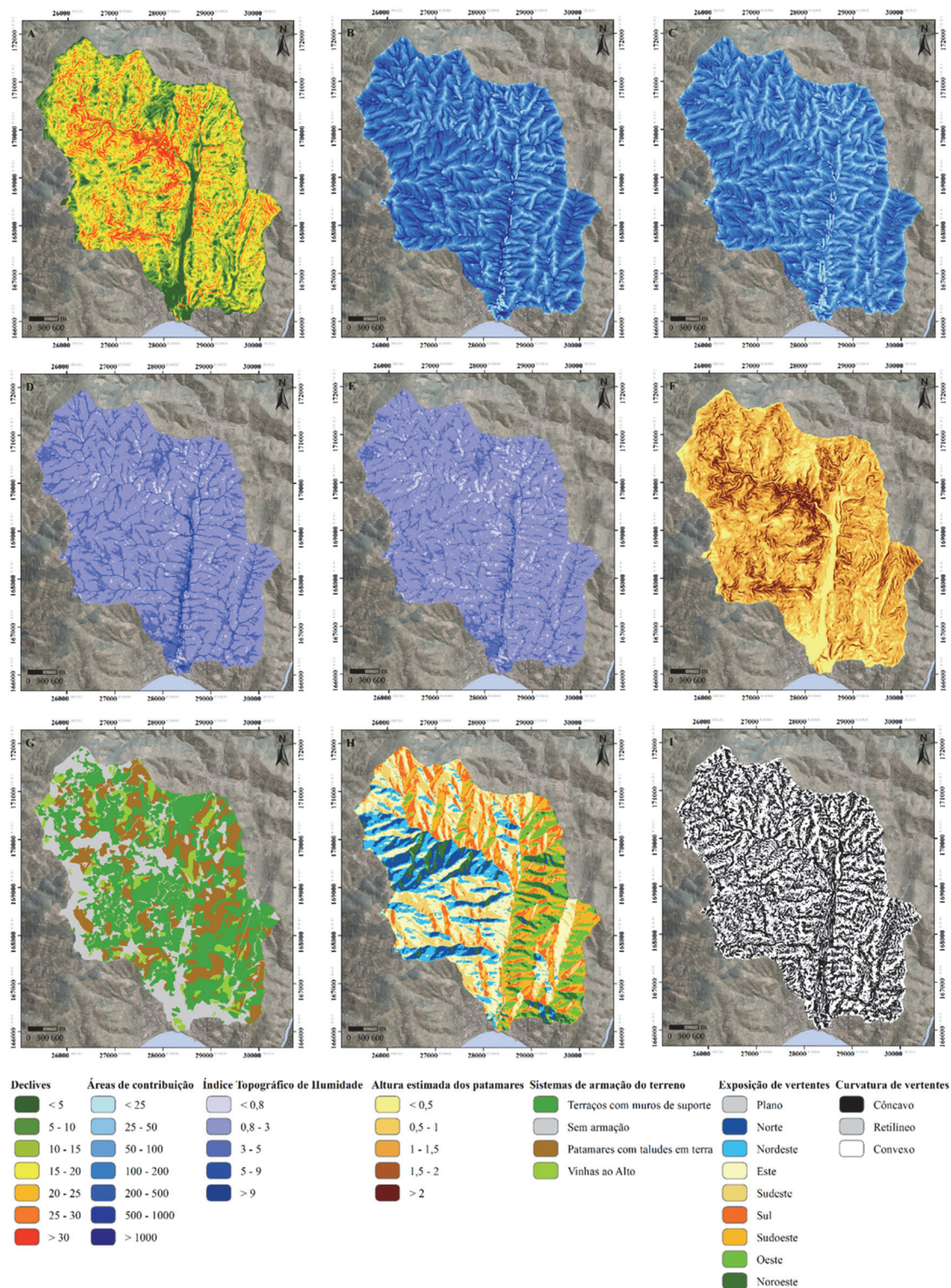


Figura 23 - Fatores topográficos da bacia hidrográfica da Meia Léguas. Fonte: Direção-Geral do Território; IGEOE.

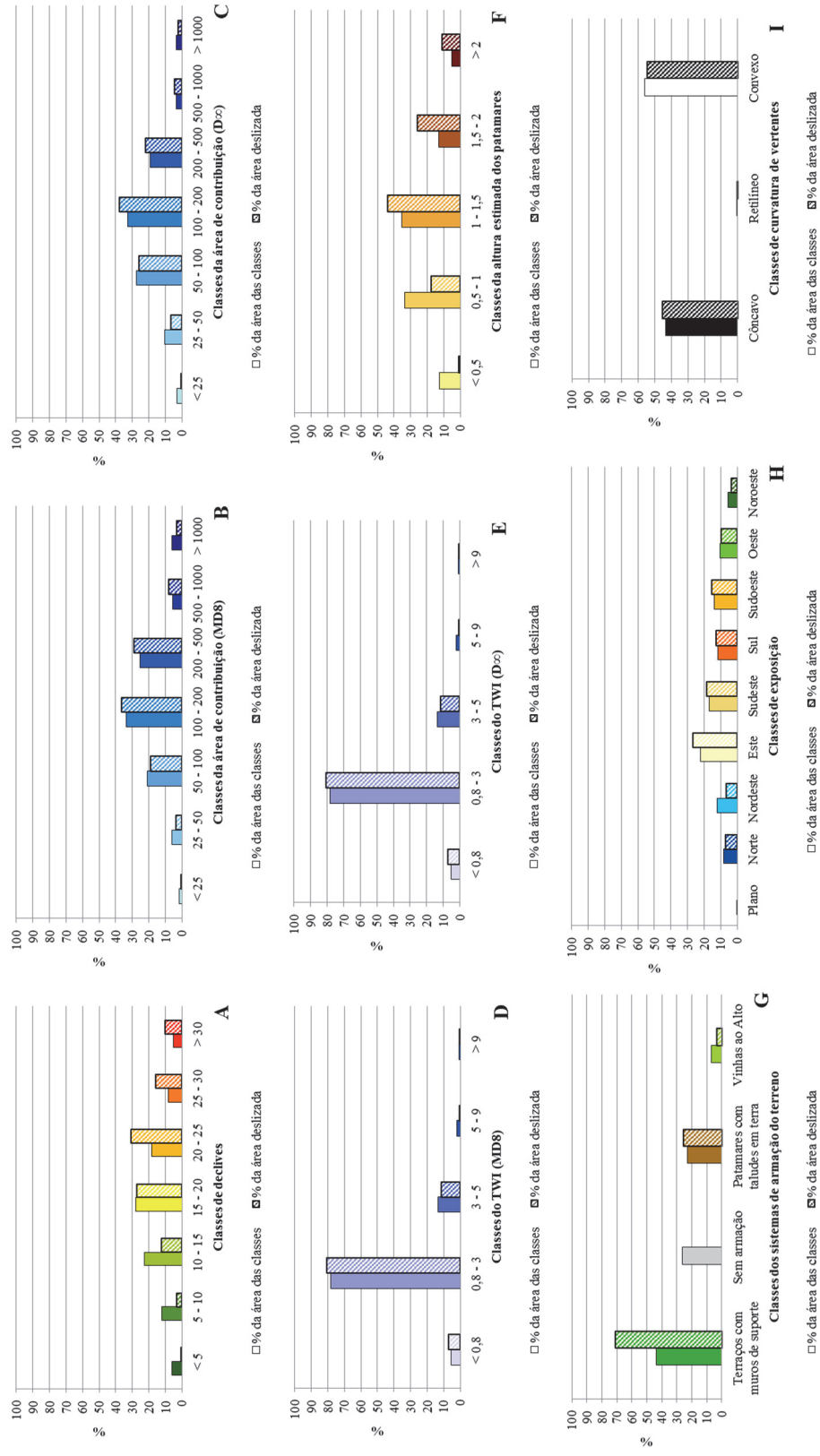


Figura 24 - Frequência relativa da área das classes e da área deslizada por classe dos fatores topográficos da bacia hidrográfica da Meia Léguas.

3.2.1. Declives

Os declives são um fator topográfico fundamental na instabilidade de vertentes pela influência que exercem na gravidade (Teixeira, 2012) bem como, na distribuição do fluxo sub-superficial.

Para a elaboração do mapa de declives de vertentes foi utilizada a ferramenta *Slope* em Raster Surface (extensão 3D Analyst Tools) tendo como base o MDE. A modelação foi realizada em graus e o mapa de declives foi classificado em 7 classes: < 5 ; $5 - 10$; $10 - 15$; $15 - 20$; $20 - 25$; $25 - 30$ e $> 30^\circ$ (Figura 23 (A)).

O mapa de declives em graus apresentou um declive mínimo de 0° , um declive máximo de 56° , um declive médio de 17° , uma mediana de 20° e um desvio padrão de 8° .

A classe $15 - 20^\circ$ foi a mais representativa (28%), seguindo-se a classe $10 - 15^\circ$ (23%) e a classe $20 - 25^\circ$ (18%) (Figura 24 (A)).

As ocorrências localizaram-se fundamentalmente nas classes $20 - 25^\circ$ (31%), $15 - 20^\circ$ (27%) e $25 - 30^\circ$ (16%) (Figura 24 (A)).

Comparativamente com a área da Quinta das Carvalhas onde os declives são superiores aos declives da bacia hidrográfica da Meia Légua, as classes com maior percentagem de área variaram entre 20 e 35° e as classes com maior percentagem de área deslizada variaram entre 30 e 40° (Faria, 2014).

3.2.2. Áreas de contribuição

A área de contribuição (m^2) é a área total drenada com contribuição a montante (representada por um pixel).

As áreas contributivas desempenham um papel significativo na avaliação da suscetibilidade à ocorrência de movimentos de vertente, visto que, se relacionam diretamente com a concentração dos fluxos de água e com a consecutiva saturação dos solos (Beven & Kirkby, 1979; Dietrich *et al.*, 1995; O'Loughlin, 1986; Vieira, 2007).

Os mapas das áreas de contribuição foram produzidos com a ferramenta *Catchment Area* (Terrain Analysis – Hydrology) do SAGA GIS através do *software* QGIS 2.6 e foram classificados em 7 classes: < 25 ; $25 - 50$; $50 - 100$; $100 - 200$; $200 - 500$; $500 - 1000$; $> 1000m^2$ (Figura 23 (B e C)).

As áreas de contribuição segundo o algoritmo MD8 (Figura 24 (B)) exibiram maior frequência relativa nas classes $100 - 200m^2$ (34% e 37% de área deslizada), $200 - 500m^2$ (25% e 29% de área deslizada) e $50 - 100m^2$ (21% e 19% de área deslizada).

As áreas de contribuição do algoritmo D_{∞} (Figura 24 (C)) apresentaram maior frequência relativa nas classes $100 - 200\text{m}^2$ (33% e 38% de área deslizada), $50 - 100\text{m}^2$ (28% e 26% de área deslizada) e $200 - 500\text{m}^2$ (19% e 22% de área deslizada).

Na área da Quinta das Carvalhas, em S. João da Pesqueira, Oliveira (2014) aplicou o algoritmo D_{∞} e Faria (2014) o MD8. O D_{∞} com o modelo A apresentou uma maior frequência relativa de área ocupada por classe entre 25 e 200m^2 e o modelo B entre < 25 e 100m^2 . No MD8 a maior frequência localizou-se entre 25 e 200m^2 e a classe $200 - 500\text{m}^2$ expôs maior percentagem de instabilidade.

3.2.3. Índice Topográfico de Humidade

O Índice Topográfico de Humidade é a razão entre o fluxo de água (área de contribuição a montante (m^2)) e o controlo topográfico das vertentes (produto entre a transmissividade do solo (m^2/dia) e o ângulo da vertente ($^{\circ}$)). Este fator condicionante modela o grau de saturação do solo quando o fluxo é constante (Guimarães *et al.*, 2003).

O Índice Topográfico de Humidade ou *Topographic Wetness Index* (TWI) foi criado por Beven e Kirkby (1979). Partindo do modelo hidrológico *TOPMODEL*, o modelo pode ser calculado com a seguinte expressão (Sørensen *et al.*, 2006):

$$\text{TWI} = \ln(a/\tan\beta) \text{ (Equação 29)}$$

Em que:

a – áreas contributivas (m^2);

$\tan\beta$ – declives das vertentes ($^{\circ}$).

Para a análise comparativa entre os dois métodos de cálculo das áreas de contribuição - o método do algoritmo D-Infinity (D_{∞}) de Tarboton D. G. (1997) e o método do algoritmo Multiple Flow Direction (MD8) de Quinn P. *et al.* (1991) - calcularam-se dois Índices Topográficos de Humidade no *Raster Calculator* em Map Algebra (extensão Spatial Analyst Tools) do *software* ArcGIS 10 a partir da Equação 29. Os mapas foram classificados em 5 classes: $< 0,8$; $0,8 - 3$; $3 - 5$; $5 - 9$ e > 9 (Figura 23 (D e E)).

Os valores mínimos retrataram o topo das vertentes e os valores máximos a base das vertentes na morfologia da bacia hidrográfica da Meia Léguas (Figura 23 (D e E)).

Com o algoritmo MD8 as frequências relativas de área das classes foram superiores em 0,8 – 3 (74%), 3 – 5 (18%) e em 5 – 9 (4%). Na frequência relativa das áreas deslizadas destacaram-se as classes 0,8 – 3 (81%), 3 – 5 (12%) e < 0,8 (7%) (Figura 24 (D)).

No algoritmo D ∞ as classes com maior frequência foram 0,8 – 3 (78% e 81% de área deslizada), 3 – 5 (14% e 12% de área deslizada) e < 0,8 (5% e 7% de área deslizada) (Figura 24 (E)).

Comparando com os resultados de Faria (2014) e de Oliveira (2014) para a Quinta das Carvalhas, conclui-se que as classes intermédias apresentaram maior área deslizada.

3.2.4. Altura estimada dos patamares

As alturas estimadas dos patamares correspondem ao $\text{sen}\alpha$ uniformizado em unidades métricas reais (Equação 30).

$$\text{AEP} = \text{sen}((\alpha / 100) b) \text{ (Equação 30)}$$

Em que:

AEP = altura estimada dos patamares;

α = declives (%);

b = largura da plataforma (cos).

O mapa foi calculado no *Raster Calculator* em Map Algebra (extensão Spatial Analyst Tools) do *software* ArcGIS 10, a partir do mapa de declives da bacia hidrográfica da Meia Léguas em percentagem, derivado do MDE, para uma largura dos patamares de 3,5m (cos).

Vale a pena recordar que o MDE foi interpolado a partir de curvas de nível com equidistância de 10m que refletem o declive médio das vertentes e, por esse facto, foi possível inferir a estimativa da altura dos patamares.

Esta variável permitiu aproximar a modelação à topografia real do terreno, pois o MDE foi produzido somente a partir da altimetria e hidrografia na escala 1:25 000, não refletindo a variação altimétrica detalhada, nomeadamente nas áreas de terraços agrícolas. Deste modo, aumentamos o detalhe dos modelos e, por sua vez, a qualidade dos resultados.

Segundo as observações efetuadas na área em estudo, os terraços agrícolas apresentam alturas e larguras aproximadas ao mapa temático das alturas estimadas dos patamares, sobretudo

nas áreas da bacia hidrográfica de patamares com taludes em terra de 2 bardos de vinha pois, estas plataformas normalmente apresentam larguras entre 3,5 e 4m.

A geometria dos terraços com muros é diferente da geometria dos patamares com taludes em terra, embora a altura de ambos os sistemas de armação seja exatamente a mesma, pois as alturas dos terraços variam de acordo com o declive médio das vertentes.

Tal significa que a variação espacial dos deslizamentos parece depender, de forma muito significativa em ambos os casos, do declive geral das vertentes. O que varia é o declive dos taludes dos terraços que nos muros em xisto é vertical.

Assim sendo, utilizou-se a variável altura estimada dos patamares na modelação de base estatística e na simulação matemática de base física, onde a espessura do solo instável (z) acompanhou a altura estimada dos patamares. A espessura (z) é metade da altura estimada do patamar (área de aterro) que varia em função do declive da vertente. Esta metodologia só pode ser aplicada em áreas com terraços.

O mapa das alturas estimadas dos patamares foi classificado em 5 classes de acordo com a realidade observada no terreno: $< 0,5$; $0,5 - 1$; $1 - 1,5$; $1,5 - 2$ e > 2 m (Figura 23 (F)).

As alturas estimadas dos patamares na Meia Léguas variaram entre 0 e 5,3m. O valor médio foi 1m, a mediana 1,3m e o desvio padrão 0,5m.

A classe $1 - 1,5$ m obteve uma maior frequência relativa (35%), posteriormente a classe $0,5 - 1$ m (34%) e a classe $1,5 - 2$ m (13%) (Figura 24 (F)).

Em termos de instabilidade a classe $1 - 1,5$ m possuiu uma maior frequência de área deslizada (44%), seguidamente a classe $1,5 - 2$ m (26%) e a classe $0,5 - 1$ m (18%) (Figura 24 (F)).

3.2.5. Sistemas de armação do terreno

Os sistemas de armação do terreno permitiram classificar a bacia hidrográfica quanto à organização das vertentes. Com a introdução dos sistemas de armação do terreno na modelação, foi fomentado o detalhe da topografia e da avaliação dos fatores condicionantes.

Na avaliação da suscetibilidade da bacia hidrográfica da Meia Léguas e provavelmente do vale do Douro, revelou-se mais importante a utilização desta variável face ao uso do solo, porque os movimentos de vertente em estudo ocorrem em terraços agrícolas (áreas de vinha).

Como foi referido, os sistemas de armação do terreno na bacia hidrográfica da Meia Léguas foram vetorizados segundo a metodologia da vectorização manual pela fotointerpretação de ortofotomapas de 2007 com uma resolução espacial de 0,5m.

Recorde-se que (ver o subcapítulo 1.4. Ocupação do solo) na área de estudo foram identificadas áreas com sistemas de armação do terreno de terraços com muros de suporte em pedra seca (socalcos pré-filoxéricos e pós-filoxéricos); áreas sem sistemas de armação do terreno; áreas com patamares com taludes em terra e áreas com vinhas ao alto.

De acordo com Santos & Sari (2011), os elementos de reconhecimento de objetos na fotointerpretação são a forma (configurações e feições dos objetos); o tamanho (dimensão da forma); a cor/tonalidade (intensidade de energia eletromagnética refletida por um tipo de forma na superfície terrestre, na dimensão de comprimento de onda); a textura (variação de tonalidade, aparente rugosidade ou suavidade de um objeto); a sombra (surge como consequência da forma do objeto e da posição solar relativamente a este no momento em que a fotografia foi tirada, através da sombra é possível calcular a altura do objeto); o posicionamento (localização do objeto em si); a associação (consiste na interpretação de determinado objeto em função da associação com diversas evidências) e o padrão (arranjo espacial de determinadas feições como aspetos geológicos, topográficos, espaços edificados ou vegetação).

Segundo estes princípios, para a vectorização dos sistemas de armação do terreno na bacia da Meia Légua, utilizaram-se os elementos forma, cor/tonalidade, textura, associação e padrão.

Analisando os resultados (Figura 24 (G)), 44% da bacia hidrográfica da Meia Légua comporta sistemas de armação do terreno de terraços com muros em xisto em pedra seca, 27% da área não apresenta armação, 23% abrange patamares com taludes em terra e apenas 7% detém sistemas de armação com vinha ao alto.

A classe de terraços com muros em xisto concentrou a maior percentagem de área deslizada (71%), seguida pela classe dos patamares com taludes em terra (25%) e a classe do arranjo das vertentes com vinha ao alto (3%).

3.2.6. Exposição de vertentes

A exposição de vertentes é um fator condicionante da suscetibilidade à ocorrência de movimentos de vertente, na medida em que determina a incidência e frequência de radiação solar e interrelaciona-se com a humidade das vertentes, com a vegetação e com a litologia, logo, apresenta um papel importante no zonamento da instabilidade (Faria, 2014; Oliveira, 2014; Teixeira, 2012; Vieira, 2007).

Para a modelação do mapa de exposição de vertentes foi utilizada a ferramenta *Aspect* em Raster Surface (extensão 3D Analyst Tools) do *software* ArcGIS 10, tendo como base o MDE. O

mapa foi classificado em octantes: Plano, Norte, Nordeste, Este, Sudeste, Sul, Sudoeste, Oeste e Noroeste (Figura 23 (H)).

No mapa de exposição de vertentes as classes com maior frequência relativa foram Este (22% e 27% de área deslizada), Sudeste (17% e 18% de área deslizada) e Sudoeste (14% e 15% de área deslizada) (Figura 24 (H)).

O trabalho desenvolvido por Vieira (2007) na bacia da Copebrás apresentou resultados similares. A bacia é maioritariamente orientada para o quadrante Sul, praticamente com 50% dos deslizamentos nas vertentes expostas a Sudeste e Sudoeste.

Já no trabalho de Oliveira (2014), a Quinta das Carvalhas apresentou mais de metade da área em vertentes expostas entre Noroeste e Este (vertentes umbrias), onde se registaram a maioria das ocorrências de instabilidade.

3.2.7. Curvatura de vertentes

A curvatura de vertentes identifica a forma das vertentes. Nas vertentes côncavas predomina a concentração e acumulação dos fluxos de escoamento superficial potenciando um maior transporte de sedimentos, um fluxo concentrado, já nas vertentes convexas, há uma maior dispersão dos fluxos de escoamento superficial, ou seja, um fluxo divergente.

O mapa da curvatura foi derivado de um MDE com 20m de pixel para obter o melhor detalhe na variação topográfica com a ferramenta *Curvature* em Raster Surface (extensão 3D Analyst Tools) do *software* ArcGIS 10. Após a modelação, converteu-se o mapa derivado para um pixel de 2m e classificou-se o mapa em perfil côncavo, retilíneo e convexo (Figura 23 (I)).

As áreas da bacia com traçado de vertente convexo ocuparam 56% da área, as vertentes com traçado côncavo ocuparam 44% e as vertentes com traçado retilíneo foram praticamente inexistentes, ocupando somente 0,4% da área da bacia (Figura 24 (I)).

Quanto à percentagem de área deslizada na bacia, 54% situou-se nas vertentes com traçado convexo e 45% nas vertentes com traçado côncavo (Figura 24 (I)).

Oliveira (2014) mencionou que na Quinta das Carvalhas as vertentes são maioritariamente côncavas e convexas, com maior número de registos de ocorrências na vertentes côncavas, apesar de as vertentes convexas exporem um registo notável de deslizamentos. Tal como na bacia hidrográfica da Meia Léguas, as vertentes com perfil retilíneo não adquiriram expressão relativamente à área total (mesmo no Modelo B com 5m de pixel da Quinta das Carvalhas que foi concebido a partir de fotografias aéreas com a resolução espacial de 50cm).

Enquanto na bacia de Copebrás predominaram as vertentes retilíneas e convexas quer em área ocupada por classe, quer em frequência de ocorrências de instabilidade (Vieira, 2007).

3.3. Parâmetros geofísicos

Os dados de textura do solo, resistência do solo à penetração, condutividade hidráulica e de capacidade de infiltração do solo na bacia hidrográfica da Meia Légua, foram recolhidos próximos de parcelas de erosão no campo experimental da Quinta das Hidrângeas em Peso da Régua entre Janeiro de 2004 e Setembro de 2006 pela equipa de investigação do projeto TERRISC.

Quanto aos restantes parâmetros, o peso específico do solo foi determinado a partir da recolha de 6 amostras de solo no terreno, com recurso a tubos de PVC; a coesão do solo foi calculada por retroanálise; o ângulo de atrito interno foi estimado a partir dos resultados das texturas dos materiais pela consulta bibliográfica; a espessura do solo instável foi modelada de acordo com as alturas estimadas dos patamares com 1 e 2 bardos de vinha.

Estes parâmetros permitiram perceber o comportamento hidrológico das vertentes organizadas em terraços na bacia hidrográfica da Meia Légua, assim como, possibilitaram simular a suscetibilidade à ocorrência de movimentos de vertente para sistemas de armação do terreno em patamares agrícolas em toda a área da bacia hidrográfica com recurso ao modelo matemático de base física SHALSTAB.

3.3.1. Textura do solo

A textura dos materiais na bacia hidrográfica da Meia Légua foi avaliada através da análise granulométrica e estatística das amostras recolhidas, de acordo com a metodologia de Folk (1954) em 3 classes: limo ou silte e argila [$\leq 0.0625\text{mm}$], areia [$0.125 - 2\text{mm}$] e seixos [$> 2\text{mm}$].

As amostras situaram-se “na área dos limos e argilas (lodo arenoso com raros seixos e lodo arenoso)” (Pereira *et al.*, 2006, p. 55).

Na parcela “RA” (Figura 25) verificou-se que a percentagem de limo e argila aumentou de acordo com a profundidade (até aos 90cm). A percentagem de areia e seixos foi notavelmente mais reduzida, diminuindo em profundidade graças ao aumento de limo e argila (Bateira *et al.*, 2005).

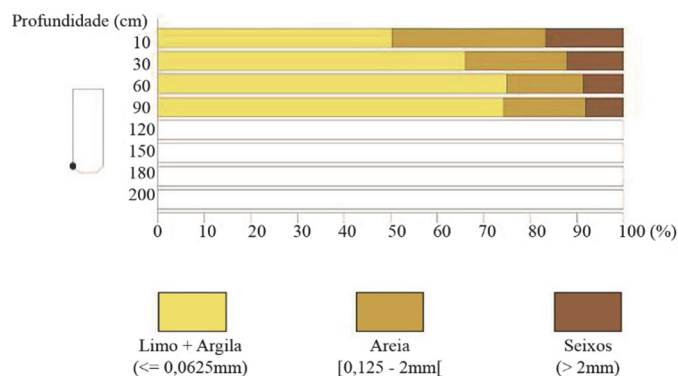


Figura 25 - Textura do solo na parcela RA. Adaptada de Bateira *et al.* (2005, p. 5).

A Quinta das Carvalhas localiza-se igualmente em formações metassedimentares e os ensaios granulométricos demonstraram uma textura que se insere no “cascalho lodoso” e “lodo cascalhento” devido à maior percentagem de silte e argila, seguida de cascalho (seixos). A percentagem de areia não atingiu os 20% (Faria, 2014).

3.3.2. Resistência do solo

A resistência do solo foi determinada com o Penetrómetro de Mão, que permite perfurar até 1m de profundidade. No campo experimental do Peso da Régua foi analisada a resistência do solo até aos 80cm de profundidade, no entanto, a partir dos 40cm foi difícil obter registos pois, o grau de compactação e a quantidade de materiais pedregosos foi significativo (Bateira *et al.*, 2005; Pereira *et al.*, 2006).

Conforme Bateira *et al.* (2005, p. 6) aos 5cm de profundidade a parcela “RA” apontou uma resistência entre 100 e 200N/cm², “encontrando-se núcleos com maior resistência nos limites superior e inferior da parcela.” Alcançando os 20cm, surgiram diversos pequenos núcleos com uma maior resistência do solo, atingindo o valor máximo de 800N/cm² (que dominou praticamente a totalidade do perfil aos 40cm de profundidade), exceto em pequenos núcleos logo após os 20cm de profundidade (Figura 26).

Foram ainda realizados 3 cortes transversais e 1 corte longitudinal na parcela de erosão (Figura 27), sendo que, o “corte 1 corresponde ao sector mais próximo da área de convergência da parcela, o corte 2 ao sector intermédio, o corte 3 ao sector mais a montante da parcela e o 4 a um corte longitudinal que atravessa a parcela a meio” (Bateira *et al.*, 2005, p. 7).

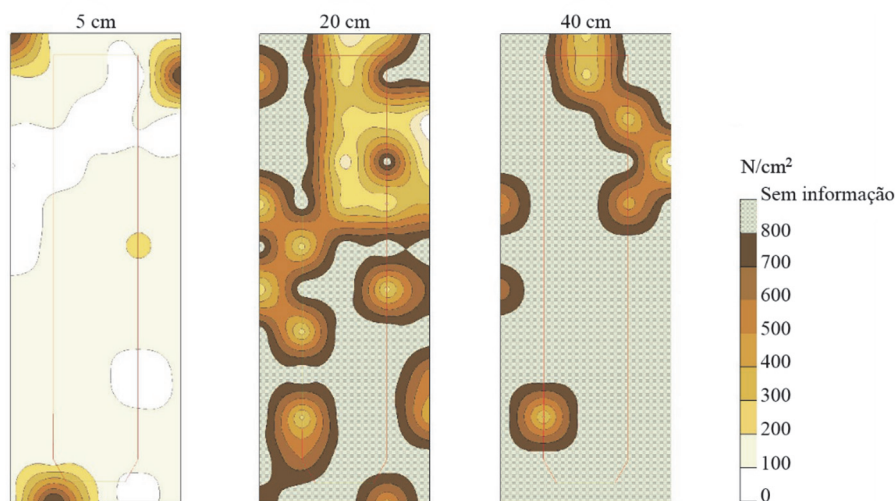


Figura 26 - Perfil de resistência do solo (5 - 40cm) na parcela RA. Adaptada de Bateira et al. (2005).

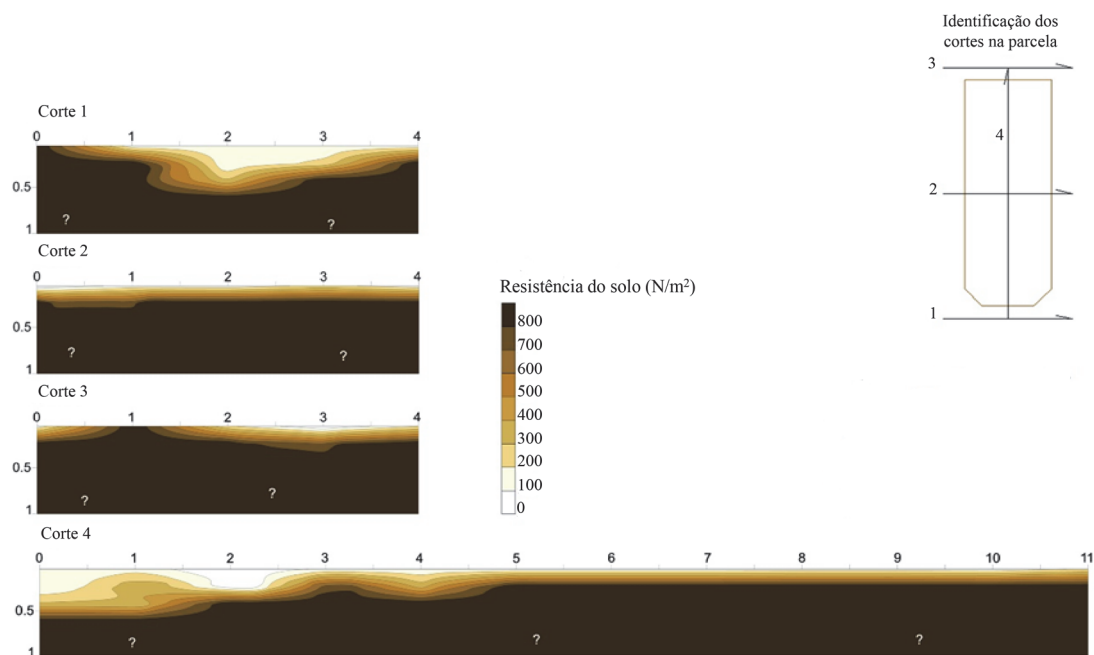


Figura 27 - Perfis transversais e longitudinal de resistência do solo na parcela RA. Adaptada de Bateira et al. (2005).

A parcela “RA” (Figura 27) exibiu uma maior resistência do solo à penetração a jusante (corte 4) e em maior profundidade. Os cortes 2 e 3 revelaram-se perfis homogêneos comparando com o corte 1, que demonstrou uma menor resistência no centro da parcela. O corte 4, até ao ponto 5 retratou o corte 1, apresentando valores de resistência do solo superiores em maior profundidade. Contrariamente, do ponto 5 ao final do corte, o valor máximo de 800N/cm^2 foi alcançado a pouca profundidade, tal como nos cortes 2 e 3 (Bateira et al., 2005).

Os perfis de resistência do solo comprovaram a existência de condições pouco favoráveis à infiltração e circulação da água nas camadas inferiores do solo, devido ao aumento da compactação dos materiais, sobretudo a partir dos 20cm. Os materiais são peliculares, facilitando o escoamento superficial da água.

3.3.3. Condutividade hidráulica

A leitura da condutividade hidráulica foi feita com o Permeâmetro de Guelph nas camadas sub-superficiais do solo (45cm). Baseada na *Lei de Darcy*, a condutividade hidráulica indica a velocidade de circulação de água no interior do solo num determinado gradiente.

Este parâmetro permitiu testar a permeabilidade do solo e foram realizadas 4 experiências por parcela (em cada extremidade) num intervalo de 2 minutos entre cada registo. Calculou-se a matriz do fluxo potencial (cm^2/s), o parâmetro α (cm^{-1}) e a condutividade hidráulica saturada (cm/s) (Bateira *et al.*, 2005).

Foram calculados os valores médios das parcelas de erosão da bacia hidrográfica da Meia Légua para cada parâmetro: $0,0110\text{cm}^2/\text{s}$ na matriz de fluxo potencial, $-0,0018\text{cm}^{-1}$ no parâmetro α e $0,0005\text{cm/s}$ na condutividade hidráulica saturada (kfs).

Estes valores destacam uma elevada capacidade de retenção de água devido à porosidade (microporos) e a velocidade de circulação da água no interior do solo revelou-se negativa em algumas amostras, devido a descontinuidades hidrológicas na estrutura do solo e à textura fina dos materiais.

Na Quinta das Carvalhas, área em que os materiais são compostos por silte, argila e cascalho, as leituras deram um valor médio de $-0,0005\text{cm}^2/\text{s}$ na matriz de fluxo potencial, $0,098\text{cm}^{-1}$ no parâmetro α e $0,0008\text{cm/s}$ na condutividade hidráulica saturada (Faria, 2014).

Estes valores sugerem que os materiais da Quinta das Carvalhas têm uma menor capacidade de absorção de água por efeito de capilaridade, na medida em que, atingiram uma menor área de retenção por unidade de tempo (cm^2/s). Assinalam ainda uma maior velocidade de circulação da água no interior do solo de acordo com α (cm^{-1}) e uma maior velocidade média de circulação da água por unidade de tempo (cm/s), por troca de ar entre as partículas no interior do solo. Ainda assim, a Quinta das Carvalhas é composta por materiais com baixa permeabilidade.

3.3.4. Capacidade de infiltração do solo

A capacidade de infiltração de água nas áreas experimentais da Quinta das Hidrângeas (Bacia da Meia Léguas) foi medida com o Infiltrómetro de Duplo Anel pelo cálculo da taxa de infiltração (cm/min).

A taxa de infiltração é influenciada pela humidade do solo, temperatura, precipitação, textura/estrutura dos materiais, inclinação da superfície topográfica (devido à ação da gravidade) e pela lavra nos terraços agrícolas e desenvolve-se nas camadas superiores do solo (zona vadosa). As medições foram ajustadas mediante curvas da função logarítmica (Bateira *et al.*, 2005).

Com as equações das linhas de tendência logarítmicas foi calculada a taxa de infiltração das parcelas da área de estudo para 2, 30 e 60 minutos e posteriormente foi calculada a taxa de infiltração média das parcelas para cada unidade de tempo. As linhas de tendência apresentaram um R^2 entre 0,7065 e 0,9635.

A taxa de infiltração média aos 2 minutos foi 1,4cm/min, aos 30 minutos foi 0,5cm/min e aos 60 minutos foi 0,3cm/min.

A parcela “RA” apresentou a taxa de infiltração mais elevada com 2,7cm/min aos 2 minutos, 1,3cm/min aos 30 minutos e 1,0cm/min aos 60 minutos.

Comparando os resultados acima expostos com os resultados analisados por Faria (2014) na Quinta das Carvalhas conclui-se que, a taxa de infiltração média inicial foi superior na bacia hidrográfica da Meia Léguas.

Verifica-se um decréscimo gradual da taxa de infiltração com o aumento da duração das experiências na Meia Léguas e nos pontos 1 e 2 da Quinta das Carvalhas. Os pontos 3, 4, 7 e 8 da Quinta das Carvalhas registaram o inverso, ou seja, um aumento da taxa de infiltração. O ponto 2 da Quinta das Carvalhas foi o ponto com maior taxa de infiltração (Faria, 2014).

As amostras de solo do ponto 2 apresentaram uma maior percentagem de cascalho do que as restantes (40%). Este ponto mostrou tanto uma menor resistência do solo em profundidade como valores elevados de condutividade hidráulica saturada (0,0002cm/s). Apesar destes valores indicarem uma baixa permeabilidade do solo, o ponto 2 patenteou uma maior capacidade do solo conduzir água no seu interior (Faria, 2014).

3.3.5. Peso específico do solo

O peso específico do solo (p_s) foi determinado a partir da recolha de 6 amostras de solo no terreno com tubos de PVC (Figura 28). Estas amostras foram pesadas em laboratório com as condições naturais do terreno, com o solo seco e com o solo saturado. Posteriormente calculou-

se o peso específico tendo como referência o peso, altura e volume do tubo. O p_s na bacia hidrográfica da Meia Légua corresponde a $14,81\text{kN/m}^3$.

Na Quinta das Carvalhas, onde os materiais são menos finos devido a uma maior percentagem de cascalho, o p_s deu $16,7\text{kN/m}^3$ (Faria, 2014).

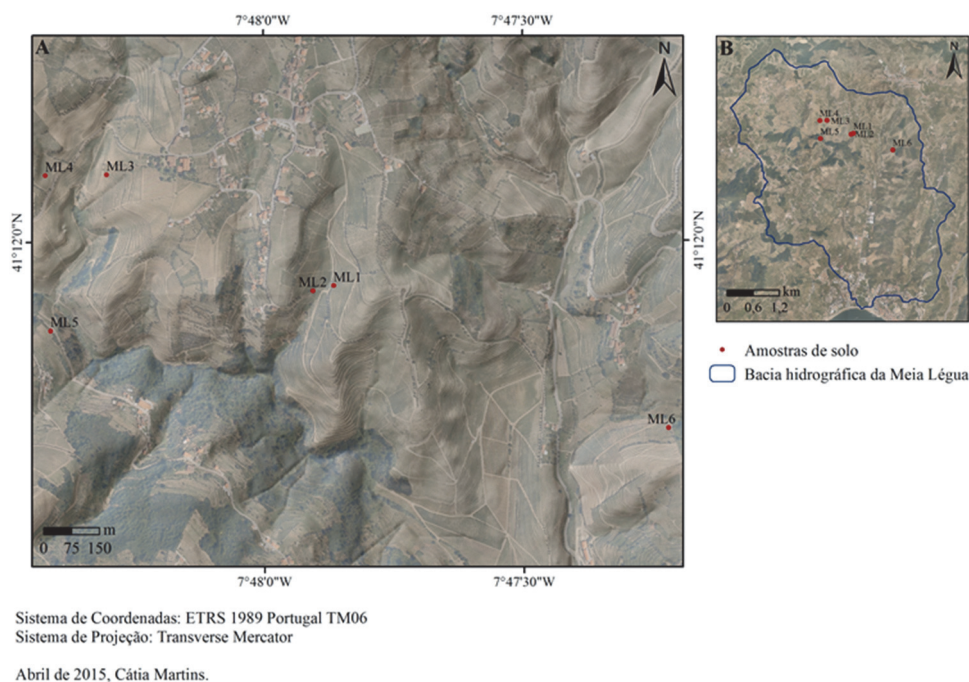


Figura 28 - A) amostras de solo recolhidas com tubos de PVC; B) enquadramento geográfico na bacia hidrográfica da Meia Légua. Fonte: IGEOE.

3.3.6. Coesão do solo

A coesão do solo (c') consiste na força que as partículas do solo exercem entre si para se manterem resistentes às pressões do meio físico. A coesão aumenta proporcionalmente com a diminuição da granulometria dos materiais, logo, os solos mais coesos a seco normalmente possuem grandes quantidades de argila e baixa força de atrito (Ward, 2004).

A coesão do solo na bacia hidrográfica da Meia Légua foi calculada por retroanálise com o *Fator de Segurança* (FS), partindo do pressuposto que as vertentes são estáveis quando o FS é igual ou superior a 1.

Partindo dos parâmetros conhecidos do FS - ângulo de atrito interno (Φ), altura do solo (h), coluna de água acima do plano de rotura (d_w), peso volumétrico do solo saturado (Y_{sat}) e declive (β) – determinou-se a coesão dos materiais das amostras de solo recolhidas (Figura 27). A coesão do solo estimada na Meia Légua é de 2300N/m^2 .

Na Quinta das Carvalhas a formação litológica das Bateiras deu uma coesão de 2900N/m^2 , de acordo com os ensaios realizados em laboratório. (Faria *et al.*, 2015).

Já na bacia hidrográfica de Tibo, em Arcos de Valdevez, Teixeira *et al.* (2014) identificaram valores de coesão para os granitóides entre 1900 e 2900N/m^2 em diferentes formações superficiais (antrossolos, depósitos solifluxivos e depósitos de vertente). Contudo, os materiais remexidos e o manto de alteração apresentaram valores de coesão superiores, entre 3000 e 5700N/m^2 .

3.3.7. Ângulo de atrito interno

O ângulo de atrito interno (Φ) é um parâmetro que determina a resistência ao cisalhamento da superfície topográfica. A definição deste parâmetro deriva do modelo de Mohr-Coulomb e é utilizado para determinar a resistência interna dos materiais à pressão, tendo em conta além do ângulo de atrito interno, a tensão normal (σ) e a coesão do solo (c'). O ângulo de atrito interno é então o ângulo de inclinação da linha de resistência ao cisalhamento relativamente ao plano horizontal (Geotechdata.info, 2013; Teixeira, 2012).

Alguns autores (Faria, 2014; Teixeira, 2012) determinaram o ângulo de atrito interno diretamente nas cicatrizes dos deslizamentos. Na bacia da Meia Légua optou-se pela consulta bibliográfica de testes laboratoriais que indicam o ângulo de atrito para materiais com textura semelhante, uma vez que, não foi possível calcular o parâmetro em laboratório com a análise das amostras de solo.

Spangler M. G & Handy RL (1984) propuseram ângulos de atrito interno entre 15 e 30° para materiais compostos por lodo arenoso molhado (Nel & Haarhoff, 2011). A USCS (2007) propôs para o lodo argiloso um ângulo de atrito interno mínimo de 18° e máximo de 32° (Geotechdata.info, 2013).

Assim, tendo em conta que os autores propõem grandes amplitudes quanto aos valores de ângulo de atrito interno, após a aplicação de experiências na área em estudo entre 15 e 30° de Φ , optou-se pela seleção dos cenários com valores mais baixos – 15 , 18 e 20° de Φ – porque os materiais deslizados são materiais remexidos e saturados.

Foram definidos 3 modelos com o objetivo de simular cenários prospetivos mais e menos prudentes. O ideal seria calcular em laboratório o valor de Φ exato para a bacia hidrográfica da Meia Légua com amostras de solo.

Na Quinta das Carvalhas, Faria *et al.* (2015) utilizaram 32° de Φ e na bacia de Tibo, em Arcos de Valdevez, Teixeira *et al.* (2014) registaram valores entre 31 e 37° .

Em áreas com forte intervenção antrópica como o vale do Douro, onde as vertentes estão organizadas em terraços, não podemos aceitar como conclusivo o ângulo de atrito interno no plano de rutura retirado no terreno porque, esta leitura tende a inflacionar os valores, particularmente em terraços com muros em xisto.

3.3.8. Espessura do solo

A espessura de solo instável (z) é outro dos parâmetros geofísicos considerados na modelação matemática de base física. A espessura de solo instável nos terraços agrícolas corresponde ao solo revolvido por utilização de mecanização, principalmente nos patamares com taludes em terra.

Nos patamares a instabilidade localiza-se nos taludes e só metade dos materiais do talude são movimentados. Ou seja, a espessura do solo instável corresponde a metade da altura da plataforma (área de aterro do patamar). Todavia, de acordo com a geometria dos patamares agrícolas, para o cálculo da espessura do solo instável deve ser considerada a altura total estimada do talude.

Este parâmetro normalmente é determinado no terreno e é utilizado como parâmetro constante. No presente trabalho a espessura do solo instável foi modelada consoante as alturas estimadas dos terraços com 1 e 2 bardos de vinha (2,5 e 3,5m de largura, respetivamente) de acordo com a seguinte metodologia:

- Inicialmente foram simulados os cenários de simulação para 0,5, 1, 1,5 e 2m de espessura com o *software* ArcView 3.2;
- Os mapas com as alturas estimadas dos patamares foram classificados entre $< 0,5$ e $> 1,5$ m;
- Os cenários SHALSTAB foram extraídos para as respetivas classes dos mapas com as alturas estimadas dos patamares;
- Por fim, os mapas resultantes foram somados de modo a combinar os cenários num só mapa, que foi classificado segundo as classes de suscetibilidade do modelo SHALSTAB (Tabela 1).

Desta forma garante-se a introdução da variação espacial da espessura do solo na aplicação do SHALSTAB, o que não acontece com o *software* disponível.

3.4. Considerações finais

Os fatores que afetam a instabilidade na bacia hidrográfica da Meia Légua são: sistemas de armação do terreno com muros em xisto; declives entre 15 e 25°; áreas de contribuição entre 50 e 500m²; Índice Topográfico de Humidade entre 0,8 e 5 (áreas húmidas não saturadas situadas a partir da meia vertente); alturas estimadas dos patamares entre 1 e 2m; vertentes expostas entre Este e Sudoeste; vertentes convexas e côncavas.

Enquanto na Quinta das Carvalhas as condições mais propícias à instabilidade foram: vinha em patamares com talude em terra; declives entre 30 e 40°; áreas contributivas entre 200 e 500m²; igualmente áreas húmidas mas não saturadas (classes intermédias); alturas dos patamares entre 1 e 1,5m; vertentes expostas entre Noroeste e Este; vertentes côncavas e convexas (Faria, 2014; Oliveira, 2014).

Quanto aos parâmetros geofísicos, na bacia hidrográfica da Meia Légua os materiais são muito finos (lodo arenoso com raros seixos) e têm uma elevada capacidade de retenção de água por efeito de capilaridade. Os materiais demonstraram uma fraca capacidade de circulação e absorção de água nas camadas inferiores do solo devido à baixa permeabilidade. A taxa de infiltração (cm/min) revelou valores baixos, decrescendo até ao valor médio de 0,3cm/min. Estas características facilitam o escoamento superficial. No entanto, é de salientar que a pouca água que infiltra é suficiente para desencadear movimentos de vertente por saturação do solo.

A análise comparativa entre a bacia hidrográfica da Meia Légua e a Quinta das Carvalhas quanto aos resultados da monitorização permite tecer algumas considerações. A taxa de infiltração média inicial foi superior na Meia Légua (pois os materiais são mais finos) provavelmente porque estão mais remexidos superficialmente. Os materiais da Quinta das Carvalhas permitem uma maior velocidade de circulação da água no interior do solo por unidade de tempo. A maioria das experiências na Quinta das Carvalhas revelaram taxas de infiltração superiores ao longo do tempo, provavelmente devido ao maior teor de cascalho (Faria, 2014).

Capítulo 4. Modelação, Simulação e Validação

4.1. Modelação da suscetibilidade

4.1.1. Valor Informativo

O Valor Informativo foi aplicado para 2 modelos: o modelo A e o modelo B. O modelo A foi elaborado recorrendo aos seguintes fatores condicionantes: declives, áreas de contribuição (Multiple Flow Direction (MD8)), Índice Topográfico de Humidade (Multiple Flow Direction (MD8)), alturas estimadas dos patamares, sistemas de armação do terreno, exposição de vertentes e curvatura de vertentes. E o modelo B: declives, áreas de contribuição (D-Infinity ($D \infty$)), Índice Topográfico de Humidade (D-Infinity ($D \infty$)), alturas estimadas dos patamares, sistemas de armação do terreno, exposição de vertentes e curvatura de vertentes.

A aplicação do Valor Informativo à avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente deve seguir os seguintes procedimentos (Pereira, 2009; Zêzere, 1997):

1. Definição precedente das unidades matriciais de terreno de cada fator condicionante e do inventário em ambiente SIG;
2. Elaboração das matrizes binárias mediante o cruzamento de cada fator condicionante com o inventário em ambiente SIG;
3. Cálculo do Valor Informativo dos fatores condicionantes por classe (Ii);
4. Cálculo do somatório dos scores de Valor Informativo parciais das variáveis;
5. Cálculo final de divisão dos scores de Valor Informativo em classes de suscetibilidade com base na análise dos valores das unidades matriciais com movimentos de vertente (Yin e Yan, 1988, in Zêzere, 1997).

A modelação resultou na Tabela 4 e Figura 29.

Os modelos A e B foram classificados em 4 classes de acordo com as quebras da curva da taxa de sucesso: Suscetibilidade Nula ou Baixa, Suscetibilidade Moderada, Suscetibilidade Elevada e Suscetibilidade Muito Elevada (Figura 29).

No modelo A (Figura 29 (A)) foram adotados os pontos de inflexão da curva da taxa de sucesso 0,10, 0,48 e 0,73 e no modelo B (Figura 29 (B)) os pontos 0,12, 0,37 e 0,75.

Os *scores* do Valor Informativo (Tabela 4) resultaram da correlação entre os deslizamentos² e os mapas temáticos dos fatores condicionantes.

² Grupo de treino ou modelação do inventário do projeto TERRISC.

Tabela 4 - Scores do Valor Informativo por classe.

| Mapa Temático | ID | Classes | Valor Informativo |
|--|----|--------------------------------|-------------------|
| Declives | 1 | < 5 | -2,872 |
| | 2 | 5 - 10 | -1,652 |
| | 3 | 10 - 15 | -0,498 |
| | 4 | 15 - 20 | 0,071 |
| | 5 | 20 - 25 | 0,333 |
| | 6 | 25 - 30 | 0,682 |
| | 7 | > 30 | 0,86 |
| Áreas contributivas (D ∞) | 1 | < 25 | -1,135 |
| | 2 | 25 - 50 | -0,551 |
| | 3 | 50 - 100 | 0,073 |
| | 4 | 100 - 200 | 0,13 |
| | 5 | 200 - 500 | 0,114 |
| | 6 | 500 - 1000 | -0,564 |
| | 7 | > 1000 | -0,333 |
| Áreas contributivas (MD8) | 1 | < 25 | -1,655 |
| | 2 | 25 - 50 | -0,727 |
| | 3 | 50 - 100 | 0,035 |
| | 4 | 100 - 200 | 0,074 |
| | 5 | 200 - 500 | 0,1 |
| | 6 | 500 - 1000 | 0,093 |
| | 7 | > 1000 | -0,397 |
| Índice Topográfico de Humidade (D ∞) | 1 | < 0,8 | 0,262 |
| | 2 | 0,8 - 3 | 0,069 |
| | 3 | 3 - 5 | -0,529 |
| | 4 | 5 - 9 | -0,682 |
| | 5 | > 9 | -0,782 |
| Índice Topográfico de Humidade (MD8) | 1 | < 0,8 | -0,087 |
| | 2 | 0,8 - 3 | 0,106 |
| | 3 | 3 - 5 | -0,319 |
| | 4 | 5 - 9 | -0,799 |
| | 5 | > 9 | -0,899 |
| Alturas estimadas dos patamares | 1 | < 0,5 | -2,935 |
| | 2 | 0,5 - 1 | -0,601 |
| | 3 | 1 - 1,5 | 0,231 |
| | 4 | 1,5 - 2 | 0,572 |
| | 5 | > 2 | 0,89 |
| Sistemas de armação do terreno | 1 | Terraços com muros de suporte | 0,527 |
| | 2 | Sem armação | -1,077 |
| | 3 | Patamares com taludes em terra | 0,029 |
| | 4 | Vinhas ao Alto | -0,977 |
| Exposição de vertentes | 1 | Plano | -0,679 |
| | 2 | Norte | -0,444 |
| | 3 | Nordeste | -0,579 |
| | 4 | Este | 0,264 |
| | 5 | Sudeste | 0,155 |
| | 6 | Sul | 0,049 |
| | 7 | Sudoeste | 0,076 |
| | 8 | Oeste | -0,276 |
| | 9 | Noroeste | -0,089 |
| Curvatura de vertentes | 1 | Côncavo | 0,057 |
| | 2 | Retilíneo | 0,433 |
| | 3 | Convexo | -0,051 |

As variáveis com maiores *scores* foram: alturas estimadas dos patamares, declives e os sistemas de armação do terreno, respetivamente.

As classes mais representativas foram as alturas estimadas dos patamares superiores a 1,5m, declives superiores a 25° e a classe dos terraços com muros de suporte de pedra em seco.

Relativamente aos restantes fatores, as áreas de contribuição (D_{∞}) evidenciaram as classes entre 100 e 500m²; as áreas de contribuição (MD8) as classes entre 200 e 1000m²; o Índice Topográfico de Humidade (D_{∞}) as classes entre < 0,8 e 3; o Índice Topográfico de Humidade (MD8) a classe 0,8 - 3; a exposição de vertentes as classes Este e Sudeste e a curvatura de vertentes as classes com perfil transversal retilíneo e côncavo de vertentes (Tabela 4).

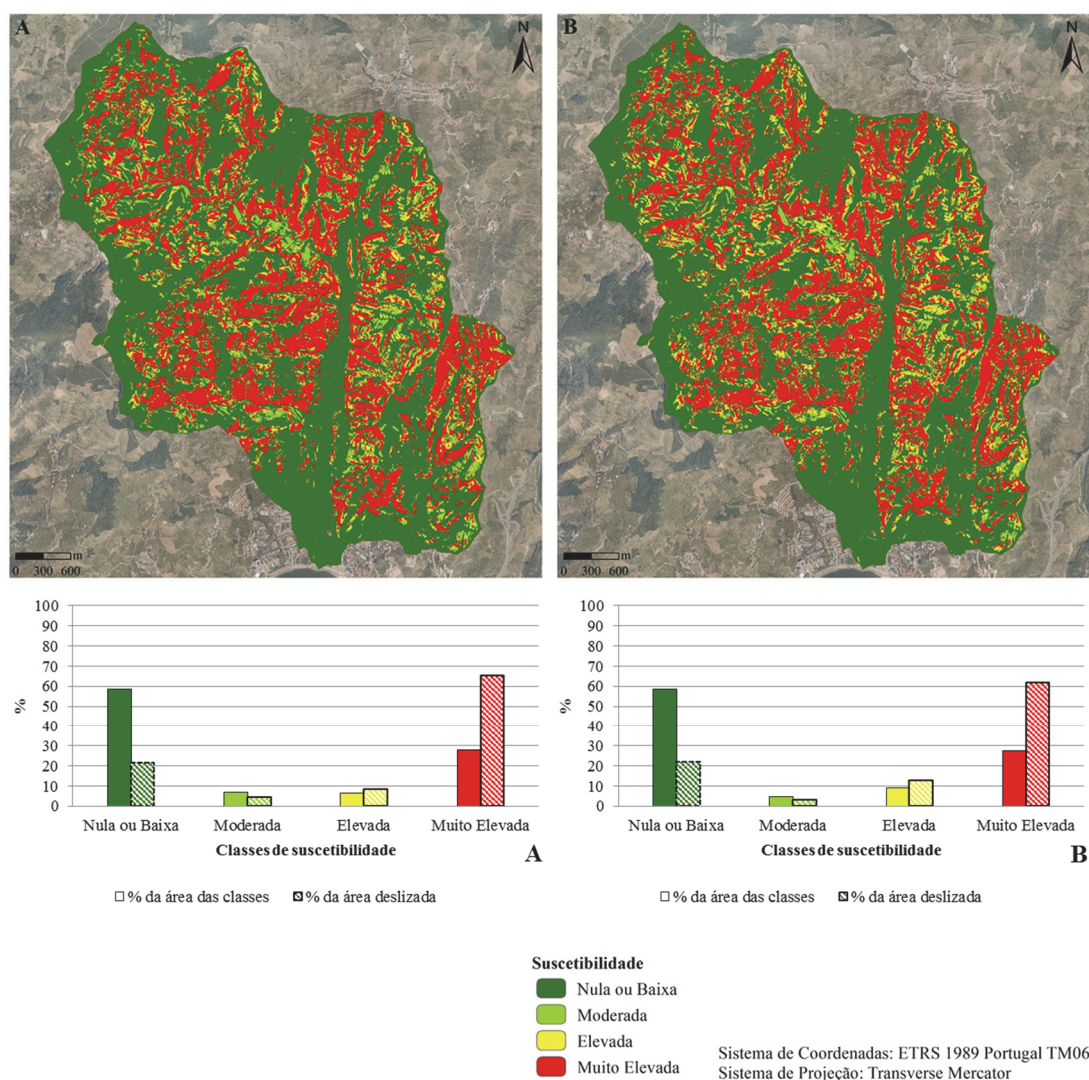


Figura 29 – Valor Informativo: A) Modelo A (MD8); B) Modelo B (D_{∞}). Fonte: IGEOE.

No modelo A (Figura 29 (A)), a bacia hidrográfica apresentou uma área de 59% de suscetibilidade nula ou baixa, 28% de suscetibilidade muito elevada, 7% de suscetibilidade moderada e 6% de suscetibilidade elevada. Verifica-se ainda que, 65% da área deslizada ocorreu

na classe de suscetibilidade muito elevada, 21% na classe de suscetibilidade nula ou baixa, 9% na classe de suscetibilidade elevada e 5% na classe de suscetibilidade moderada.

No modelo B (Figura 29 (B)), a bacia hidrográfica detém uma área de 59% de suscetibilidade nula ou baixa, 28% de suscetibilidade muito elevada, 9% de suscetibilidade elevada e 5% de suscetibilidade moderada. 62% da área deslizada situou-se na classe de suscetibilidade muito elevada, 22% na classe de suscetibilidade nula ou baixa, 13% na classe de suscetibilidade elevada e 3% na classe de suscetibilidade moderada.

Em síntese, o modelo B representa melhor a instabilidade. A classe de suscetibilidade elevada ocupou uma área maior da bacia em B, em detrimento das áreas de suscetibilidade moderada, abrangendo 13% da área deslizada (Figura 29). No entanto, ambos os modelos (A e B) obtiveram uma maior precisão nas classes instáveis indicando *a priori* que são bons modelos.

4.1.2. Regressão Logística

A Regressão Logística foi igualmente executada para dois modelos de análise: o modelo A e o modelo B. Os fatores condicionantes utilizados foram os mesmos que no Valor Informativo, visando a análise comparativa entre os métodos de base estatística.

A probabilidade de ocorrência de cada preditor foi estimada através do *software* XLSTAT de acordo com a maximização da função de verossimilhança com o algoritmo de *Newton-Raphson*. Foi utilizado um intervalo de confiança de 95%.

A aplicação do método de Regressão Logística à avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente seguiu os seguintes procedimentos:

1. Definição precedente do inventário de pontos que corresponde à variável dependente - presença (1) ou ausência (0) de movimentos de vertente – em que o valor 1 foi representado por 50% dos pontos de instabilidade selecionados aleatoriamente para a modelação (299 movimentos de vertente) e o valor 0 foi representado por um conjunto de pontos aleatórios não coincidentes com os movimentos de vertente inventariados, criados com a ferramenta *Create Random Points* (Feature Class em Data Management Tools) do *software* ArcGIS 10 (598 pontos aleatórios);
2. Definição das unidades matriciais de terreno de cada fator condicionante em ambiente SIG;
3. Cruzamento de cada fator condicionante com os movimentos de vertente e com os pontos aleatórios em ambiente SIG;

4. Definição das ponderações de cada variável independente através da fórmula de regressão com *software* de base estatística (exemplo: R, SPSS ou XLSTAT).
5. Cálculo final do modelo de suscetibilidade a partir da aplicação da expressão de regressão em ambiente SIG (Equação 8).

Foi aplicado o *Teste de Hosmer-Lemeshow* a cada modelo, que testa a hipótese de nulidade (H_0) de que o modelo ajustado encaixa bem nos dados. No modelo A o *p-value* foi superior a 0,05 (0,673) logo, aceitou-se H_0 e no modelo B o *p-value* foi igualmente superior a 0,05 (0,687) assim, aceitou-se H_0 . Mediante esta avaliação, os modelos A e B ajustaram-se aos dados.

A Tabela 5 retrata o efeito de cada variável no modelo A e a Tabela 6 no modelo B. A coluna “Valor” é o coeficiente de regressão e mede o impacto da variação unitária de x (variáveis independentes) no logaritmo do “risco” de $Y=1$ ($\log(\pi/1-\pi)$). Neste sentido, a interpretação dessa coluna só é clara em relação ao sinal (se este é positivo ou negativo na probabilidade). A grandeza do impacto impôs o cálculo de “Exp(Valor)” que resultou da transformação logística da probabilidade (Valor). Foi a partir destes valores (Exp (Valor)) que os cenários foram modelados mediante o cálculo da equação de regressão através do *Raster Calculator* em Map Algebra (extensão Spatial Analyst Tools) do *software* ArcGIS 10.

Tabela 5 - Coeficientes padronizados do Modelo A de Regressão Logística.

| Fonte | Valor | Pr > Qui ² | Exp(Valor) |
|--------------------------------------|--------|-----------------------|-------------------|
| Índice Topográfico de Humidade (MD8) | -0,069 | 0,340 | -0,216 |
| Declives | 0,074 | 0,559 | 0,092 |
| Áreas de contribuição (MD8) | 0,066 | 0,338 | 0,096 |
| Exposição de vertentes | 0,085 | 0,043 | 0,083 |
| Curvatura de vertentes | -0,036 | 0,413 | 0,066 |
| Sistemas de armação do terreno | -0,205 | < 0,0001 | -0,378 |
| Alturas estimadas dos patamares | 0,287 | 0,020 | 0,510 |
| Constante | | | -2,16529320557763 |

Tabela 6 - Coeficientes padronizados do Modelo B de Regressão Logística.

| Fonte | Valor | Pr > Qui ² | Exp(Valor) |
|--------------------------------------|--------|-----------------------|-------------------|
| Índice Topográfico de Humidade (D ∞) | -0,056 | 0,405 | -0,191 |
| Declives | 0,075 | 0,554 | 0,093 |
| Áreas de contribuição (D ∞) | 0,069 | 0,302 | 0,104 |
| Exposição de vertentes | 0,089 | 0,035 | 0,087 |
| Curvatura de vertentes | -0,031 | 0,475 | -0,057 |
| Sistemas de armação do terreno | -0,203 | < 0,0001 | -0,374 |
| Alturas estimadas dos patamares | 0,290 | 0,019 | 0,515 |
| Constante | | | -2,30032186589029 |

Segundo a métrica dos “riscos”: valores inferiores a 1 indicam que o impacto vai no sentido de diminuir o “risco” de ocorrência do que está a ser modelado; valores superiores a 1 indicam que o impacto vai no sentido de aumentar o “risco” de ocorrência e valores iguais a 1 indicam que a probabilidade é a mesma para ambos.

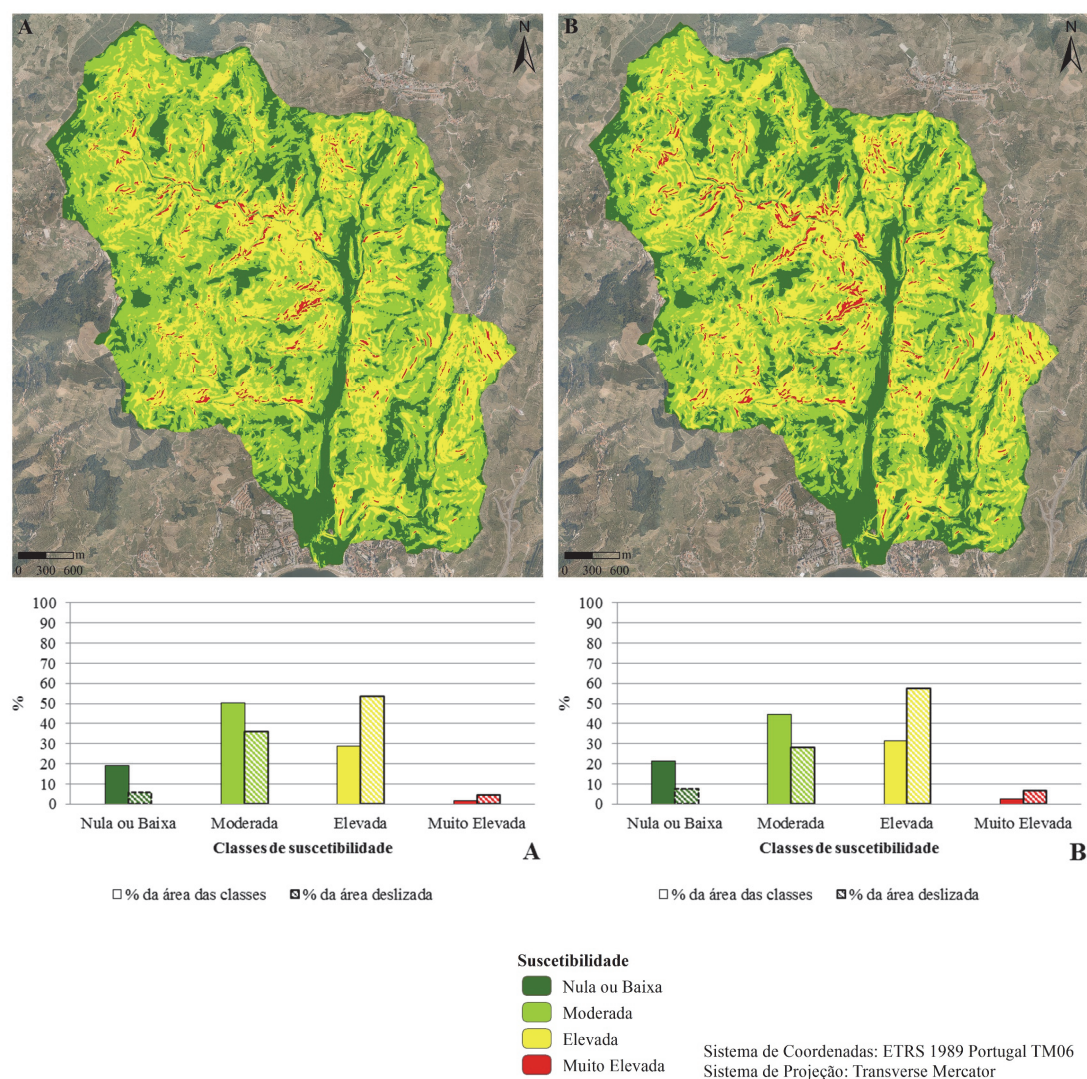
No modelo A (Tabela 5) o impacto da variação unitária do Índice Topográfico de Humidade (MD8) fez diminuir o “risco” de Y=1 em 122%; os declives em 91%; as áreas de contribuição (MD8) em 90%; a exposição de vertentes em 92%; a curvatura de vertentes em 93%; a armação do terreno em 138% e as alturas estimadas dos patamares em 49%.

No modelo B (Tabela 6) o impacto repetiu-se e a grandeza para o Índice Topográfico de Humidade (D ∞) foi de 119%; para os declives foi 91%; para as áreas de contribuição (D ∞) foi 91%; para a exposição de vertentes foi 90%; para a curvatura de vertentes foi 106%; para os sistemas de armação do terreno foi 137% e para as alturas estimadas dos patamares foi de 49%.

Conclui-se que o aumento da probabilidade de ocorrência da variável dependente não foi explicado pelos fatores condicionantes no seu conjunto. Cada classe de cada fator condicionante tem influência na probabilidade de Y=1, na medida em que, umas classes aumentam e outras diminuem a suscetibilidade à ocorrência do fenómeno em estudo. Isto foi constatado anteriormente na análise individual dos fatores condicionantes (ver 3.1.2. Fatores topográficos no subcapítulo 3.1. Dados).

Na coluna “Pr > Qui²” (Tabelas 5 e 6) encontramos o resultado do teste de significância estatística *Qui-quadrado de Wald* equivalente ao *Teste T* da regressão linear. Mais uma vez, se o *p-value* for interior a α (5%), a variável independente é estatisticamente significativa, logo, tem impacto sobre a variável dependente. Portanto, nos modelos A e B as variáveis estatisticamente significantes foram os sistemas de armação do terreno, as alturas estimadas dos patamares e a exposição de vertentes.

Os modelos A e B foram classificados segundo o método de classificação cartográfico semiautomático das quebras da curva da taxa de sucesso (Figura 30).



No modelo A (Figura 30 (A)) foram adotados os pontos de inflexão da curva da taxa de sucesso 0,15, 0,37 e 0,69 e no modelo B (Figura 30 (B)) os pontos 0,16, 0,35 e 0,66.

O cenário do modelo A (Figura 30 (A)) apresentou 50% de área com suscetibilidade moderada, 29% de área com suscetibilidade elevada, 19% de área com suscetibilidade nula ou baixa e 2% de área com suscetibilidade muito elevada.

No que concerne à área deslizada por classe (%), no modelo A, 53% ocupou a classe de suscetibilidade elevada, 36% a classe de suscetibilidade moderada, 6% a classe de suscetibilidade nula ou baixa e 5% a classe de suscetibilidade muito elevada (Figura 30 (A)).

O cenário do modelo B (Figura 30 (B)) obteve 45% de área com suscetibilidade moderada, 31% de área com suscetibilidade elevada, 22% de área com suscetibilidade nula ou baixa e 2% de área com suscetibilidade muito elevada.

Quanto à área deslizada por classe (%), no modelo B, 57% situou-se na classe de suscetibilidade elevada, 28% na classe de suscetibilidade moderada, 8% na classe de suscetibilidade nula ou baixa e 7% na classe de suscetibilidade muito elevada (Figura 30 (B)).

4.1.3. Validação

Curva da Taxa de Sucesso (AAC)

A taxa de sucesso foi calculada para os modelos A e B dos métodos de base estatística do Valor Informativo e da Regressão Logística, mediante o cruzamento entre os cenários concretizados e as ocorrências de instabilidade, isto é, 50% da amostra de movimentos de vertente que foi utilizada para a modelação³.

A curva da taxa de sucesso e a área abaixo da curva (AAC) foram calculadas em Microsoft Excel. A AAC foi calculada a partir da Equação 20 (ver tópico Curva da Taxa de Sucesso em 2.3.3. Modelos utilizados).

A Figura 31 representa a curva da taxa de sucesso do modelo A do Valor Informativo. A área abaixo da curva (AAC) foi 0,7521, ou seja, 75% das ocorrências foram preditas com sucesso. Conforme a Figura 32, a área abaixo da curva (AAC) no modelo B foi 0,7518. Isto significa que, no modelo B, 75% dos deslizamentos foram corretamente preditos.

As Figuras 33 e 34 apresentam as curvas da taxa de sucesso dos modelos A e B do método de Regressão Logística, respetivamente. No modelo A, a área abaixo da curva (AAC) foi 0,6983 e no modelo B, a AAC foi 0,6987. Sendo assim, 70% das ocorrências foram corretamente preditas em ambos os modelos.

³ Grupo de treino ou modelação do inventário do projeto TERRISC.

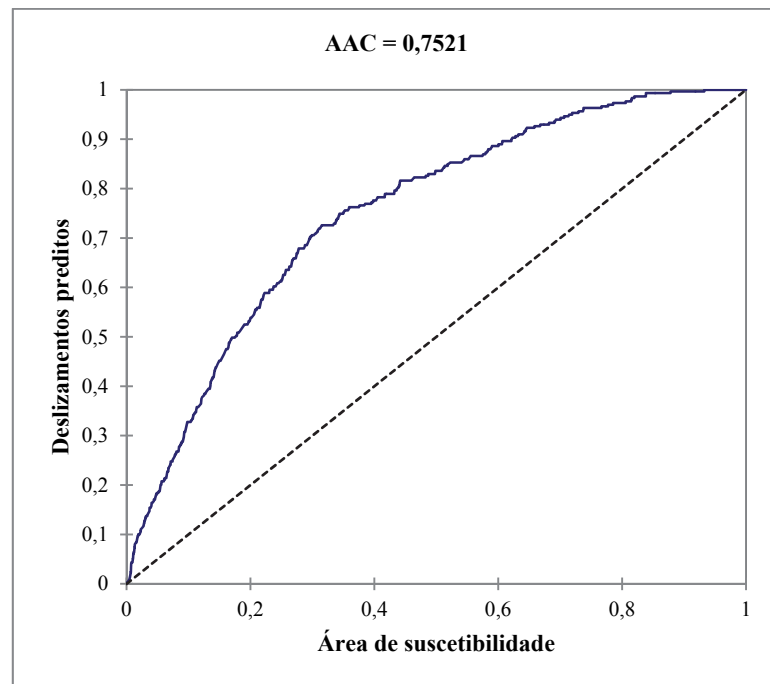


Figura 31 - Curva da taxa de sucesso do Modelo A do Valor Informativo.

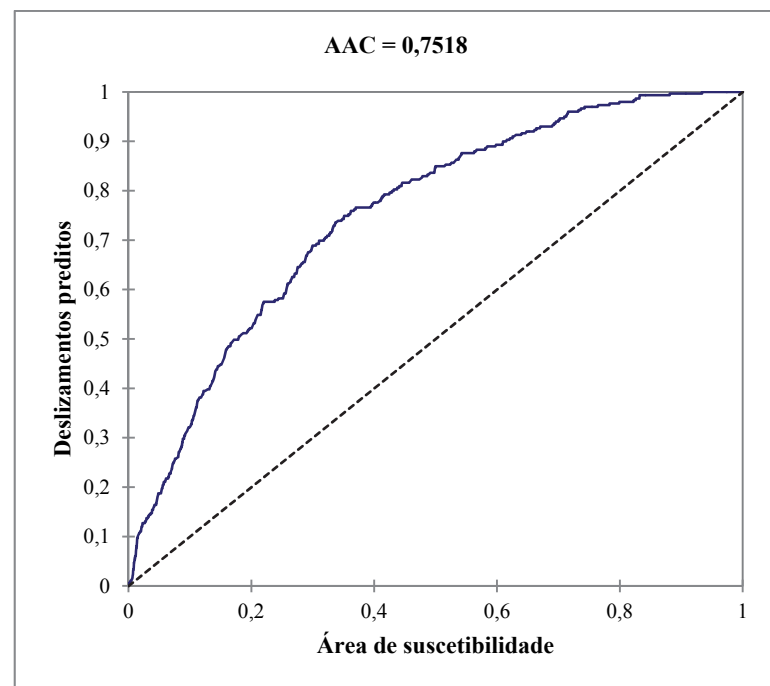


Figura 32 - Curva da taxa de sucesso do Modelo B do Valor Informativo.

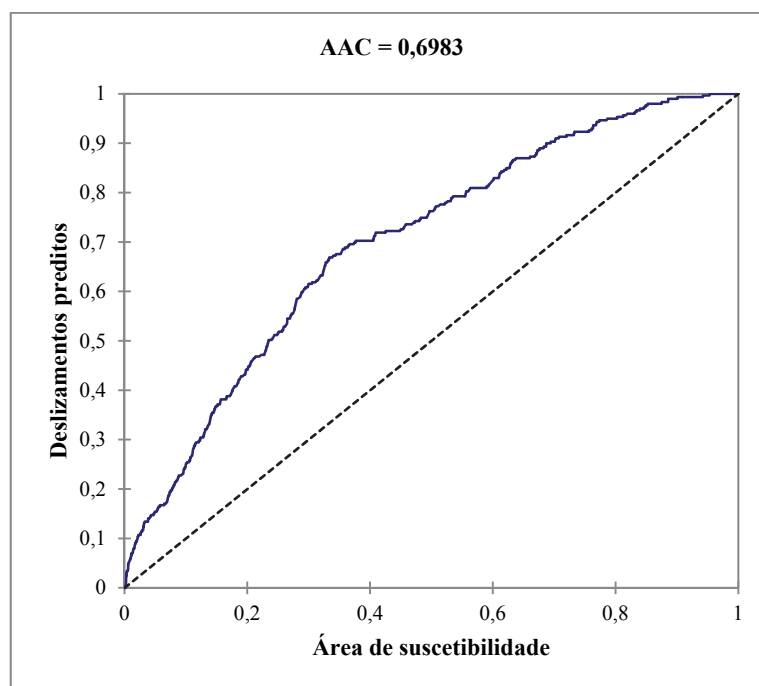


Figura 33 - Curva da taxa de sucesso do Modelo A de Regressão Logística.

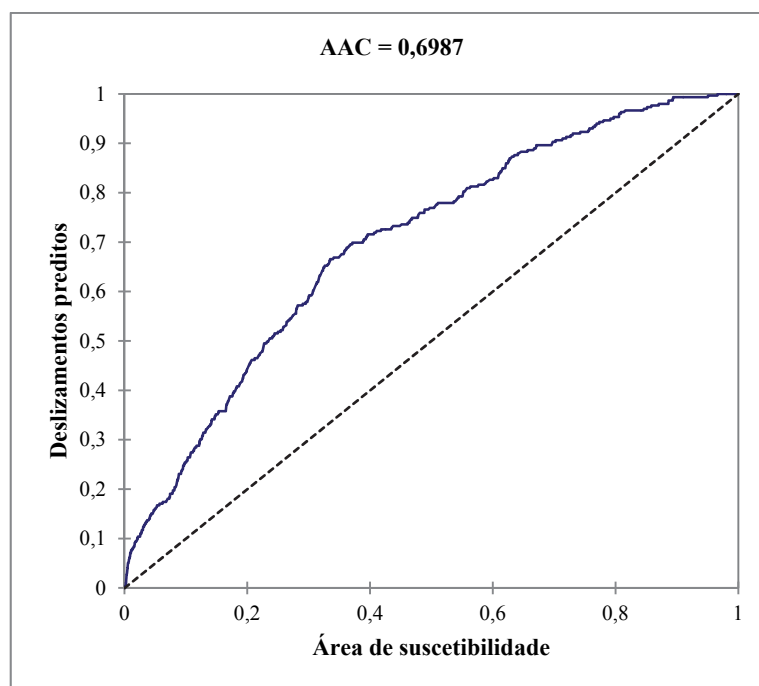


Figura 34 - Curva da taxa de sucesso do Modelo B de Regressão Logística.

Curva ROC (AAC)

A curva ROC foi utilizada como método de validação dos modelos A e B produzidos com o método estatístico de Regressão Logística. Os modelos foram avaliados a partir da interpretação do valor da área abaixo da curva (AAC), tal como na taxa de sucesso.

A curva ROC e a área abaixo da curva (AAC) foram calculadas automaticamente pelo *software* XLSTAT (ver tópico Curva ROC em 2.3.3. Modelos utilizados).

O modelo A (Figura 35) apresentou uma área abaixo da curva de 0,7081 e o modelo B (Figura 36) apresentou uma área abaixo da curva de 0,7074. Ou seja, 71% dos movimentos de vertente foram preditos corretamente no modelo A e no modelo B.

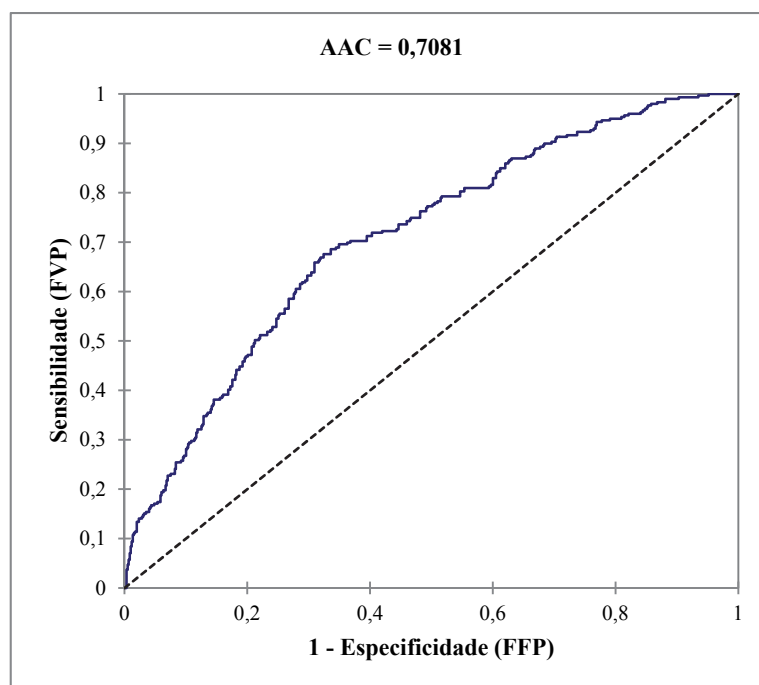


Figura 35 - Curva ROC do Modelo A de Regressão Logística.

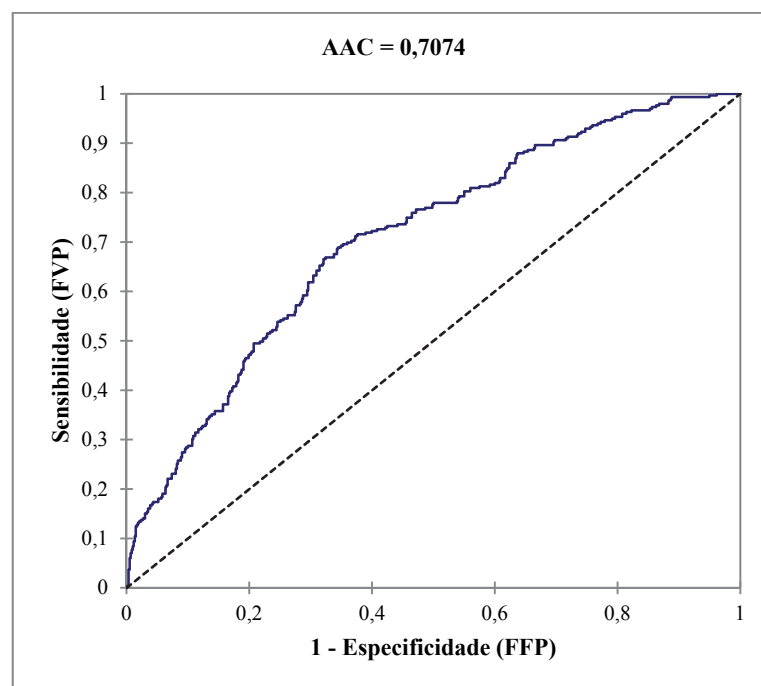


Figura 36 - Curva ROC do Modelo B de Regressão Logística.

Tabelas de contingência

O processo de validação com as tabelas de contingência para os métodos de base estatística - Valor Informativo e Regressão Logística - recorreu ao grupo de teste do inventário do projeto TERRISC (50% da amostra selecionada aleatoriamente, que soma um total de 298 ocorrências representadas por pixéis com 2m de lado (4m²)). Foi a partir desta metodologia de validação que selecionaram-se os melhores cenários de suscetibilidade.

Os índices de diagnóstico RVP (rácio de verdadeiros positivos), RFP (rácio de falsos positivos), ACC (acurácia ou fiabilidade), PPV (precisão ou potencial de deslizamento) e F1 (média ponderada de verdadeiros positivos) foram calculados com base nas tabelas de contingência previamente construídas (ver tópico Tabelas de contingência em 2.3.3. Modelos utilizados).

Para a seleção do melhor cenário em cada um dos métodos de análise estatística procedeu-se à eleição do cenário com maior RVP.

No método do Valor Informativo (Tabela 7) o RVP deu 73% de deslizamentos corretamente preditos nos modelos A e B. Tendo em conta que a diferença de RVP entre os modelos A e B não foi significativa, analisaram-se os restantes índices, sobretudo o PPV, que indica a capacidade preditiva das classes instáveis.

Sendo assim, o melhor modelo do método do Valor Informativo é o A porque, este modelo apresentou melhores resultados nos restantes índices, apesar de a diferença de PPV ter sido pouco expressiva.

Tabela 7 - Resultados da validação do método do Valor Informativo.

| Modelos | RVP | RFP | ACC | PPV | F1 |
|----------------|------------|------------|------------|------------|-----------|
| A | 72,82 | 34,38 | 65,63 | 0,014 | 0,028 |
| B | 73,49 | 36,58 | 63,42 | 0,013 | 0,026 |

Tabela 8 - Resultados da validação do método de Regressão Logística.

| Modelos | RVP | RFP | ACC | PPV | F1 |
|----------------|------------|------------|------------|------------|-----------|
| A | 58,05 | 30,58 | 69,42 | 0,0124 | 0,0247 |
| B | 64,09 | 33,89 | 66,11 | 0,0123 | 0,0246 |

No método estatístico de Regressão Logística (Tabela 8) o modelo B expôs melhores resultados de validação pois, o RVP foi superior neste cenário, com 64% das ocorrências corretamente preditas. Os restantes índices mostraram melhores resultados no modelo A, apesar de pouco significantes no PPV e no F1. Isto significa que a melhor previsão da instabilidade feita pelo modelo B é possível pelo facto de definir áreas instáveis mais alargadas.

4.1.4. Análise comparativa: modelação estatística

Tabela 9 - Resultados da validação dos melhores cenários dos métodos estatísticos em análise.

| Modelos | Método | RVP | RFP | ACC | PPV | F1 | AAC |
|----------------|----------------------------|------------|------------|------------|------------|-----------|------------|
| A | Valor Informativo | 72,82 | 34,38 | 65,63 | 0,014 | 0,028 | 75,21 |
| B | Regressão Logística | 64,09 | 33,89 | 66,11 | 0,012 | 0,025 | 69,87 |

O melhor cenário de suscetibilidade foi o modelo A do método estatístico do Valor Informativo pois, o rácio de verdadeiros positivos (RVP), a precisão (PPV), a média ponderada de verdadeiros positivos (F1) e a área abaixo da curva segundo a taxa de sucesso (AAC) foram

superiores neste modelo. O rácio de falsos positivos (RFP) e a acurácia (ACC) expuseram a mesma percentagem em ambos os modelos (Tabela 9).

Confrontando a cartografia com os resultados da validação (Tabela 9) é possível salientar que, o método do Valor Informativo obteve melhores resultados de validação porque as áreas classificadas como instáveis apresentaram maior precisão. O cenário do Valor Informativo atribuiu maior peso à variável sistemas de armação do terreno, ou seja, o cenário classificou as áreas sem armação do terreno como estáveis, aumentando o RVP.

Todavia estes métodos de validação apenas avaliam a qualidade global dos modelos, não discriminando as classes estáveis e instáveis, nomeadamente, a classificação entre áreas com suscetibilidade elevada e áreas com suscetibilidade muito elevada.

O modelo de Regressão Logística, inversamente ao modelo do Valor Informativo, expôs uma área de suscetibilidade elevada claramente superior à área classificada como suscetibilidade muito elevada, que somente ocupou 2% da área total da bacia da Meia Léguas. Por outro lado, o modelo de Regressão Logística, relativamente ao modelo do Valor Informativo, diminuiu a percentagem de área deslizada nas áreas classificadas com suscetibilidade nula ou baixa, em detrimento das áreas classificadas com suscetibilidade moderada.

Concluindo, o modelo do Valor Informativo previu melhor a suscetibilidade global da bacia hidrográfica da Meia, na medida em que expôs melhores resultados de validação. Contudo, o modelo de Regressão Logística revelou uma maior capacidade de discriminação das classes de suscetibilidade, sobretudo das classes instáveis. Portanto, o modelo de Regressão Logística permite optar melhor pelas unidades de terreno prioritárias a intervir.

4.2. Simulação da suscetibilidade

4.2.1. SHALSTAB

A Equação 31 mostra o resultado da combinação dos dois módulos (hidrológico e de estabilidade) do modelo SHALSTAB executado (ver C. SHALSTAB em 2.3.3. Modelos utilizados).

$$\log(Q_c/T) = \tan\theta/(a/b) [(c'/p_w g z \cos^2\theta \tan\Phi) + (p_s/p_w) (1 - (\tan\theta/\tan\Phi))] \text{ (Equação 31)}$$

Em que:

Q_c = precipitação efetiva necessária para o desencadeamento de deslizamentos translacionais (mm);

T = transmissividade do solo (m^2/dia);

a = área de contribuição (m^2);

θ = declives ($^\circ$);

b = comprimento da unidade de terreno (m);

c' = coesão efetiva do solo (KPa);

p_w = densidade da água ou peso específico da água (Kg/m^3);

p_s = densidade global do solo saturado ou peso específico do solo (Kg/m^3);

g = aceleração gravitacional (m/s^2);

z = espessura do solo instável (m);

Φ = ângulo de atrito interno do solo ($^\circ$).

A implementação desta equação em ambiente SIG na bacia da Meia Léguas, para um pixel de 2m ($4m^2$), permitiu classificar a área em termos de suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos translacionais. As classes de suscetibilidade foram representadas de acordo com o $\log Q_c/T$ (logaritmo de valor real).

A simulação consistiu na criação de cenários de suscetibilidade em patamares agrícolas com 1 e 2 fiadas de vinha. Em teoria, estamos a modelar uma situação futura em que a condição de partida é a modificação da bacia da Meia Léguas para taludes com plataformas de uma única dimensão. Para os patamares com 1 bardo de vinha adotou-se uma largura de 2,5m e para patamares com 2 bardos, 3,5m. Consideraram-se patamares com 1 e 2 bardos de vinha para ilustrar diferentes opções a quem decide na gestão do risco.

Este modelo matemático de base física, como já referido, baseia-se nos fatores topográficos - declives e áreas de contribuição (a/b) segundo o algoritmo Multiple Flow Direction (MD8) - bem como, no peso específico do solo (p_s), coesão do solo (c'), ângulo de atrito interno (Φ) e espessura do solo instável (z) da área de estudo. Na bacia da Meia Léguas foram usados os seguintes parâmetros geofísicos: $p_s = 14,81KN/m^3$; $c' = 2300N/m^2$; $\Phi = 15 - 20^\circ$ e $z = < 0,5 - > 2m$.

Foram elaborados 6 cenários, com 3 modelos (A, B e C) para cada uma das duas simulações apresentadas (1 e 2 bardos por patamar), segundo duas perspetivas:

- Simulação da suscetibilidade para toda a área da bacia hidrográfica da Meia Léguas;

- Simulação da suscetibilidade para um conjunto de 8 áreas de patamares tradicionais reconvertidas em 2013 para patamares com taludes em terra entre os muros antigos, localizadas no Nordeste da bacia hidrográfica da Meia Légua. Aqui, a simulação resultou da extração dos cenários de suscetibilidade simulados para toda a área da bacia.

Nestes cenários, os parâmetros geofísicos foram constantes exceto o ângulo de atrito interno (Φ) e a espessura do solo instável (z). O Φ foi o elemento diferenciador dos 3 modelos (20, 18 e 15°) e z foi modelada consoante as alturas estimadas dos patamares com 1 e 2 bardos de vinha (ver 3.3.8. Espessura do solo no subcapítulo 3.3. Parâmetros geofísicos).

Para a simulação da suscetibilidade foram utilizados os *softwares* ArcGIS 10, ArcView 3.2 e Microsoft Excel.

A cartografia dos cenários de suscetibilidade foi classificada de acordo com a Tabela 1 (Figuras 37 e 38).

A análise dos diferentes cenários de suscetibilidade da bacia da Meia Légua apresentados seguidamente recorreu ao cálculo e representação gráfica das frequências relativas de cada classe de suscetibilidade e da área deslizada por classe de suscetibilidade (Figuras 37 e 38).

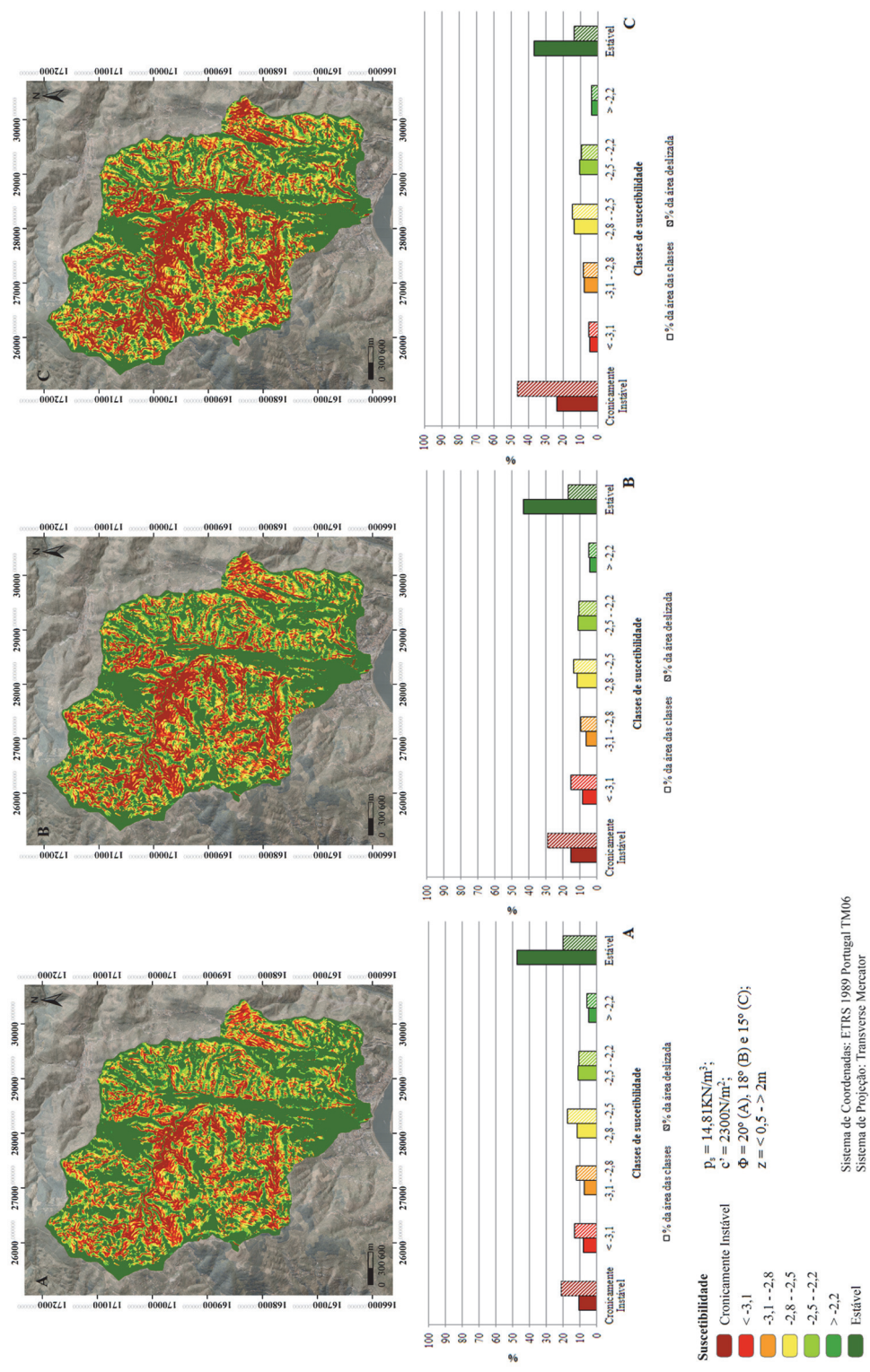


Figura 37 - SHALSTAB: patamares agrícolas com 1 bardo de vinha. Fonte: IGEOE.

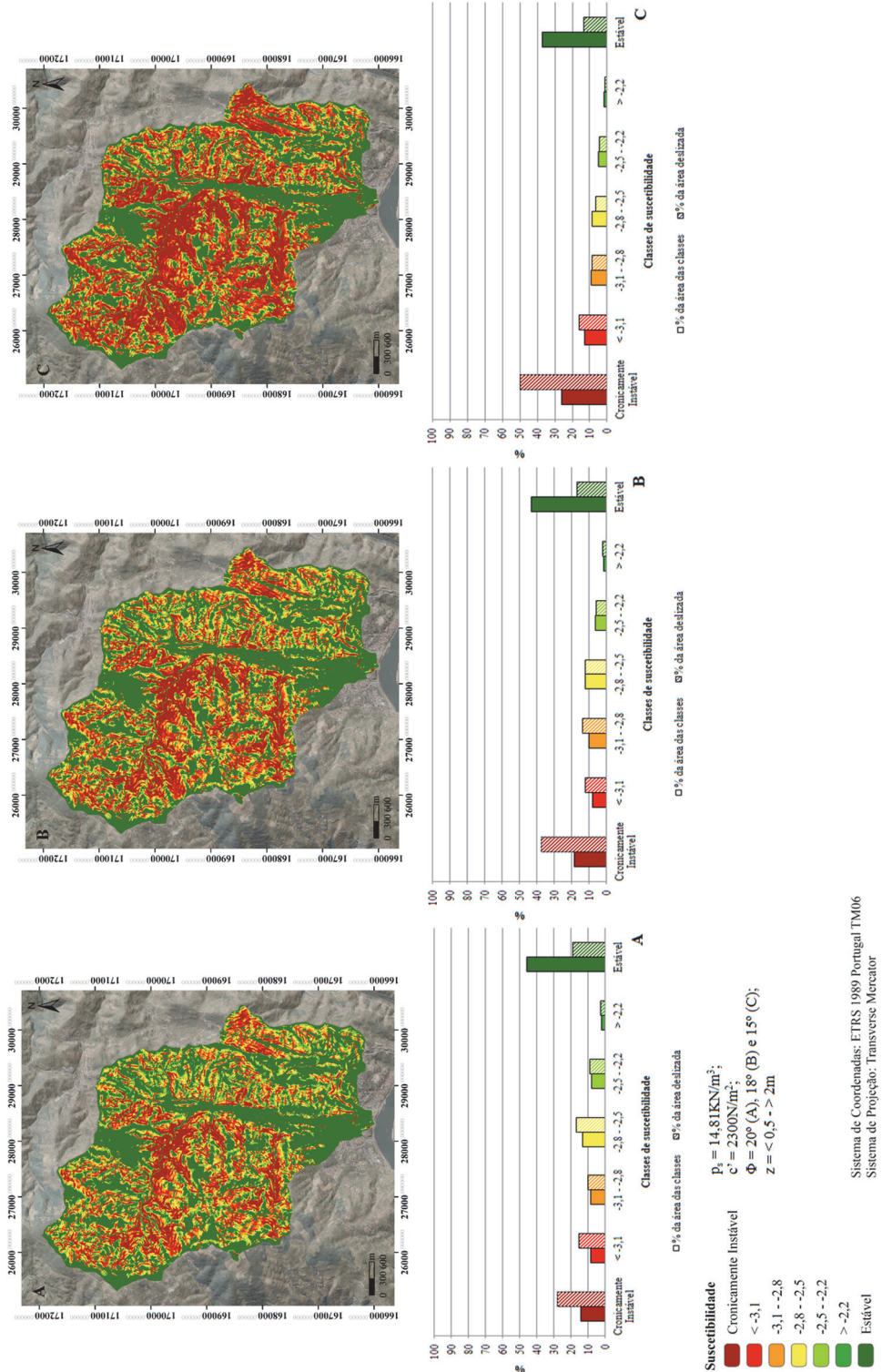


Figura 38 - SHALSTAB: patamares agrícolas com 2 bardos de vinha. Fonte: IGEOE.

MODELO A: $p_s = 14,81\text{KN/m}^3$; $c' = 2300\text{N/m}^2$; $\Phi = 20^\circ$ e $z = < 0,5 - > 2\text{m}$

Conforme o cenário da Figura 37 (A) as classes mais relevantes na bacia da Meia Légua foram: estável (47%), instável e não saturado (11%) e estável e não saturado (11%).

Quanto à percentagem de área deslizada destacaram-se as classes: cronicamente instável (21%), estável (20%) e instável e não saturado (17%) (Figura 37 (A)).

No cenário da Figura 38 (A) as maiores percentagens de área das classes de suscetibilidade foram identificadas nas classes: estável (46%), cronicamente instável (14%) e instável e não saturado (13%).

Já a maior percentagem de área deslizada foi identificada nas classes: cronicamente instável (28%), estável (19%) e instável e não saturado (17%) (Figura 38 (A)).

MODELO B: $p_s = 14,81\text{KN/m}^3$; $c' = 2300\text{N/m}^2$; $\Phi = 18^\circ$ e $z = < 0,5 - > 2\text{m}$

O cenário B alusivo à Figura 37 revela que a bacia da Meia Légua é sobretudo estável (43%), cronicamente instável (15%) e instável mas não saturada (11%).

A área deslizada preencheu 68% das vertentes classificadas como instáveis e 32% das vertentes classificadas como estáveis. As classes mais representativas em registo de ocorrências foram as classes: cronicamente instável (29%), estável (17%) e incondicionalmente instável e não saturado (15%) (Figura 37 (B)).

Relativamente ao cenário B da Figura 38, as classes com maior área ocupada da bacia hidrográfica foram as classes: estável (43%), cronicamente instável (19%) e instável e não saturado (12%).

No cenário B da Figura 38, a área deslizada completou 75% das vertentes classificadas como instáveis e 25% das vertentes consideradas estáveis. Sendo que, 37% da área deslizada localizou-se na classe cronicamente instável, 17% na classe estável, 14% na classe instável e saturado e 24% nas restantes classes classificadas instáveis.

MODELO C: $p_s = 14,81\text{KN/m}^3$; $c' = 2300\text{N/m}^2$; $\Phi = 15^\circ$ e $z = < 0,5 - > 2\text{m}$

O cenário C da Figura 37 demonstrou que, com estes parâmetros, a bacia hidrográfica da Meia Légua foi especialmente integrada pelas classes: estável (37%), cronicamente instável (24%) e instável e não saturado (14%).

Com o cenário C da Figura 37, 46% da área deslizada ocupou a classe cronicamente instável, 15% ocupou a classe instável e não saturado e 13% circunscreveu-se à classe incondicionalmente estável e saturado ou estável.

O cenário C da Figura 38 indica que a bacia da Meia Légua é principalmente estável (37%), cronicamente instável (26%) e incondicionalmente instável e não saturada (13%). 81% da área da bacia hidrográfica foi classificada como instável e portanto 19% foi qualificada como estável. Enquanto com 1 bardo de vinha as vertentes instáveis completaram 74% da bacia e as vertentes estáveis ocuparam 26%.

No cenário C da Figura 38, no que concerne à área deslizada por classe (%), as classes mais expressivas foram: incondicionalmente instável e saturado ou cronicamente instável (50%), incondicionalmente instável e não saturado (16%) e estável (13%).

Concisamente, as classes com maior frequência relativa de área deslizada por modelo foram:

- Modelo A (20° de Φ) - cronicamente instável, estável e instável e não saturado;
- Modelo B (18° de Φ) - cronicamente instável, estável, incondicionalmente instável e não saturado, instável e saturado e instável e não saturado;
- Modelo C (15° de Φ) - cronicamente instável, incondicionalmente instável e não saturado, instável e não saturado e estável.

4.2.2. Validação

Na validação do SHALSTAB, os inventários utilizados não correspondem às áreas modeladas para patamares agrícolas unicamente com taludes em terra. As ocorrências foram registadas no terreno em muros caídos ou reconstruídos. Admite-se que os pontos de instabilidade registados em sistemas de armação do terreno com muros de pedra em seco são indicadores das áreas de instabilidade, mesmo que as vertentes sejam sujeitas a outro sistema de armação do terreno. Por esse motivo a presente validação pode ser pouco fiável uma vez que se considera que o inventário está realizado por defeito, constituindo somente um indicador de avaliação dos cenários da simulação para quem pretende fazer intervenção no terreno e implantar um sistema de terraços agrícolas.

Tabelas de contingência

A simulação da suscetibilidade na bacia hidrográfica da Meia Légua foi validada com os índices de diagnóstico RVP (rácio de verdadeiros positivos), RFP (rácio de falsos positivos), ACC (acurácia ou fiabilidade), PPV (precisão ou potencial de deslizamento) e F1 (média ponderada de verdadeiros positivos). Os índices foram calculados em Microsoft Excel a partir das tabelas de

contingência previamente produzidas para cada cenário (ver tópico Tabelas de contingência em 2.3.3. Modelos utilizados).

- Validação da simulação da suscetibilidade em toda a bacia hidrográfica da Meia Léguas

Considerou-se a totalidade do inventário do projeto TERRISC (597 ocorrências), uma vez que, a simulação de métodos matemáticos de base física (como o SHALSTAB) não incorpora o inventário dos movimentos de vertente e, assim sendo, não é necessária a partição da base de dados como nos métodos de base estatística (ver subcapítulo 4.1. Modelação da suscetibilidade).

A Tabela 10 mostra os resultados da validação para patamares com 1 bardo de vinha: o RVP foi superior no modelo C (74%); o RFP foi inferior no modelo A (37%); a ACC foi superior no modelo A (63% de fiabilidade); a PPV foi superior no modelo A (0,022% de potencial de deslizamento) e o F1 foi superior no modelo A com 0,045% de precisão dos verdadeiros positivos.

Tabela 10 - Resultados da validação do método SHALSTAB para patamares com 1 bardo de vinha na bacia hidrográfica da Meia Léguas.

| Modelos | Φ | RVP | RFP | ACC | PPV | F1 |
|----------------|--------------------------|------------|------------|------------|------------|-----------|
| A | 20 | 63,65 | 37,01 | 62,99 | 0,022 | 0,045 |
| B | 18 | 68,01 | 41,53 | 58,48 | 0,021 | 0,043 |
| C | 15 | 74,04 | 49,17 | 50,83 | 0,020 | 0,039 |

Tabela 11 - Resultados da validação do método SHALSTAB para patamares com 2 bardos de vinha na bacia hidrográfica da Meia Léguas.

| Modelos | Φ | RVP | RFP | ACC | PPV | F1 |
|----------------|--------------------------|------------|------------|------------|------------|-----------|
| A | 20 | 69,85 | 43,86 | 56,14 | 0,0208 | 0,0416 |
| B | 18 | 74,87 | 48,81 | 51,19 | 0,0200 | 0,0400 |
| C | 15 | 80,90 | 56,46 | 43,54 | 0,0187 | 0,0374 |

Para patamares com 2 bardos de vinha (Tabela 11) os resultados foram: o RVP foi superior no modelo C (81%); o RFP foi inferior no modelo A (44%); a ACC foi superior no modelo A (56% de fiabilidade); a PPV foi superior no modelo A (0,0208% de potencial de deslizamento) e o F1 foi superior no modelo A com 0,0416% de precisão dos verdadeiros positivos.

- Validação da simulação da suscetibilidade em áreas alteradas em 2013 (NE da bacia hidrográfica da Meia Légua)

A simulação da suscetibilidade em áreas alteradas em 2013 para patamares com taludes em terra, construídos entre os muros de pedra em seco de terraços pós-filoxera, teve como objetivo inicial validar os cenários de simulação em áreas reconvertidas em patamares de taludes em terra (com 1 a 2 bardos de vinha), de modo a obter uma validação mais ajustada às simulações. Contudo, os processos de instabilidade nestas áreas foram registados em muros de pedra em seco. Por outro lado, caso tenha havido processos de instabilidade em taludes de patamares agrícolas, por vezes é difícil o seu registo em inventário porque rapidamente são corrigidos pelas práticas agrícolas.

O inventário correspondeu a 47 deslizamentos inventariados em Janeiro de 2015 numa sub-bacia da bacia hidrográfica da Meia Légua localizada a Nordeste (Figura 21).

Nestas áreas, foi elaborada também uma validação para patamares com 1 e 2 bardos de vinha, de acordo com os parâmetros utilizados para os modelos A, B e C (Tabelas 12 e 13).

Tabela 12 - Resultados da validação do método SHALSTAB para patamares com 1 bardo de vinha nas áreas alteradas em 2013.

| Modelos | Φ | RVP | RFP | ACC | PPV | F1 |
|----------------|--------------------------|------------|------------|------------|------------|-----------|
| A | 20 | 42,55 | 30,92 | 69,06 | 0,1079 | 0,215 |
| B | 18 | 44,68 | 36,41 | 63,58 | 0,0962 | 0,192 |
| C | 15 | 51,06 | 45,16 | 54,84 | 0,0887 | 0,177 |

Tabela 13 - Resultados da validação do método SHALSTAB para patamares com 2 bardos de vinha nas áreas alteradas em 2013.

| Modelos | Φ | RVP | RFP | ACC | PPV | F1 |
|----------------|--------------------------|------------|------------|------------|------------|-----------|
| A | 20 | 48,94 | 38,80 | 61,19 | 0,099 | 0,197 |
| B | 18 | 53,19 | 45,67 | 54,33 | 0,091 | 0,182 |
| C | 15 | 68,09 | 57,07 | 42,95 | 0,094 | 0,187 |

Para patamares com 1 bardo de vinha os resultados da validação foram os seguintes (Tabela 12): o RVP foi superior no modelo C (51% dos deslizamentos foram corretamente previstos) enquanto o RFP foi inferior no modelo A (31% de área instável incorretamente prevista); a ACC foi superior no modelo A (69% de fiabilidade); a PPV foi superior no modelo A (0,1079% de

potencial de deslizamento) e o F1 foi superior no modelo A, com 0,215% de precisão dos verdadeiros positivos.

A Tabela 13 exhibe os resultados da validação das áreas alteradas para patamares com 2 bardos de vinha. O RVP foi superior no modelo C onde 68% das ocorrências foram registadas em vertentes classificadas como instáveis; o RFP foi inferior no modelo A com 39% das vertentes classificadas como instáveis sem registos de ocorrências; a ACC foi superior no modelo A (61% de fiabilidade); a PPV foi superior no modelo A (0,099% de potencial de deslizamento) e o rácio de medição F1 foi superior no modelo A com 0,197% de precisão dos verdadeiros positivos.

Pela comparação dos índices de validação não foi possível concluir qual a melhor opção na medida em que, o único parâmetro de diferenciação dos modelos foi o ângulo de atrito interno (Φ). Seria sempre o modelo C (15° de Φ) devido ao maior RVP mas, à custa de uma fraca capacidade de discriminação dos dados nas vertentes classificadas como instáveis (RFP elevado).

Este parâmetro baseou-se na pesquisa bibliográfica de valores de Φ para materiais silto-argilosos. Foram realizados ensaios entre 20 e 15° de Φ , dada a impossibilidade momentânea da realização do cálculo em laboratório com amostras de solo para a determinação concreta dos valores de coesão e ângulo de atrito interno do solo no sector estudado.

Apesar disso, o facto de o RVP só atingir valores aceitáveis considerando os ângulos de atrito de 15° e 18° faz supor que as características de textura dos materiais que constituem a bacia da Meia Légua (elevada componente argilosa) permitem processos de instabilidade com declives relativamente baixos, só consentâneos com ângulos de atrito reduzidos. A análise desenvolvida apresenta-se coerente com os dados conhecidos sobre o comportamento destes materiais em teste de laboratório. Porém, é essencial que se proceda ao cálculo em laboratório da coesão e ângulo de atrito no sentido de expurgar o conjunto de simulações feitas de qualquer dúvida relativamente a estes parâmetros.

Assim sendo, concluímos que todos os cenários podem ser utilizados para intervir no terreno uma vez que, estes permitem optar por soluções prospetivas mais e menos preventivas. No domínio da gestão do risco, ambos podem ser implementados consoante os objetivos da intervenção. O modelo com 15° de Φ (C), apresentou os valores do RVP mais próximos de valores aceitáveis da instabilidade verificada. Todavia, consideramos que o modelo B foi o cenário mais aceitável pois, este modelo obteve valores de RFP inferiores ao modelo C.

4.3. Análise comparativa das metodologias

Por fim, foi realizada uma análise comparativa entre os melhores cenários de validação da modelação e da simulação da suscetibilidade para a percepção da presença ou ausência de coincidência espacial nas áreas classificadas como estáveis e instáveis.

O modelo A do método do Valor Informativo e os cenários do Modelo B do método SHALSTAB, foram intersectados nas áreas com sistemas de armação do terreno, em ambiente SIG com o *software* ArcGIS 10.

Esta análise foi executada para toda a área da bacia hidrográfica da Meia Légua (Tabela 14), bem como, para as áreas alteradas em 2013 para patamares com taludes em terra entre os muros pós-filoxera (Tabela 15).

Tabela 14 - Resultados da análise comparativa entre os melhores modelos do Valor Informativo e do SHALSTAB nas áreas com sistemas de armação do terreno da bacia hidrográfica da Meia Légua.

| Patamares agrícolas | Área coincidente (%) | Área discordante (%) |
|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| <i>1 bardo de vinha</i> | 81 | 19 |
| <i>2 bardos de vinha</i> | 86 | 14 |

Analisando os resultados da Tabela 14 constatou-se que o cenário simulação de patamares agrícolas com 1 bardo de vinha apresentou 81% de área espacialmente coincidente com o cenário do Valor Informativo (19% da área foi espacialmente discordante).

Quanto ao cenário de simulação de patamares agrícolas com 2 bardos de vinha (Tabela 14), 86% da área com sistemas de armação do terreno, coincidiu espacialmente com o cenário do Valor Informativo, logo, 14% da área foi espacialmente discordante.

Tabela 15 - Resultados da análise comparativa entre os melhores modelos do Valor Informativo e do SHALSTAB extraídos para as áreas alteradas em 2013.

| Patamares agrícolas | Área coincidente (%) | Área discordante (%) |
|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| <i>1 bardo de vinha</i> | 77 | 23 |
| <i>2 bardos de vinha</i> | 86 | 14 |

Nas áreas alteradas em 2013, o cenário dos patamares agrícolas com 1 bardo de vinha apresentou 77% de área espacialmente coincidente e 23% de área espacialmente discordante com o cenário do Valor Informativo. Enquanto o cenário dos patamares agrícolas com 2 bardos de

vinha expôs 86% de área coincidente e 14% de área discordante com o cenário do Valor Informativo (Tabela 15).

Em síntese, os cenários do SHALSTAB para patamares agrícolas com 2 bardos de vinha revelaram resultados mais ajustados ao cenário do Valor Informativo (Modelo B) porque, a bacia hidrográfica da Meia Légua, de acordo com a experiência de observação no terreno, apresenta essencialmente terraços agrícolas com 2 bardos de vinha.

Conclusões

A modelação da suscetibilidade à ocorrência de movimentos de vertente na bacia hidrográfica da Meia Légua com recurso aos métodos estatísticos do Valor Informativo e de Regressão Logística foi efetivada para 2 modelos de análise: o modelo A e o modelo B.

O modelo A utiliza o método do algoritmo Multiple Flow Direction (MD8) e o modelo B o método do algoritmo D-Infinity (D_{∞}). Os modelos foram validados com a curva da taxa de sucesso (AAC), com a curva ROC (AAC) e com os índices das tabelas de contingência.

Os algoritmos representaram algumas diferenças: o MD8 concentrou a área da bacia da Meia Légua nas classes com áreas de contribuição até 500m², enquanto o algoritmo D_{∞} centrou a área da bacia da Meia Légua nas classes entre 200 e 500m² e distribuiu mais homogeneamente a área restante pelas classes inferiores e superiores.

Esta análise leva-nos a concluir que o algoritmo MD8 modela o fluxo sub-superficial através de caminhos preferenciais do solo e o algoritmo D_{∞} modela um fluxo sub-superficial essencialmente difuso. A análise alvitra que o MD8 representa melhor os processos de instabilidade registados, pois os deslizamentos situaram-se entre 100 e 500m² e a análise dos parâmetros geofísicos sugere que o essencial do escoamento interno é feito através de caminhos preferenciais de drenagem no interior do solo, desencadeando processos de instabilidade por saturação do solo.

Na curva da taxa de sucesso o modelo A do Valor Informativo apresentou uma área abaixo da curva (AAC) superior, com 75% das ocorrências corretamente preditas.

Na curva ROC foi o modelo A do método de Regressão Logística que atingiu uma maior área abaixo da curva (AAC), com 71% de precisão.

O método de validação das tabelas de contingência demonstrou que o melhor cenário do Valor Informativo foi o modelo A porque, com um rácio de verdadeiros positivos (RVP) igual ao modelo B (de 73%), este modelo apresentou melhores resultados de validação nos restantes índices. O melhor cenário no método de Regressão Logística foi o cenário do modelo B com um RVP claramente superior (64%).

Após a análise comparativa entre os melhores cenários do método do Valor Informativo e do método de Regressão Logística, concluiu-se que o modelo A do Valor Informativo foi o melhor cenário pelos melhores resultados de validação: além do rácio de verdadeiros positivos (RVP), a precisão (PPV), a média ponderada de Verdadeiros Positivos (F1) e a área abaixo da curva segundo a taxa de sucesso (AAC), foram superiores neste modelo. O rácio de falsos positivos

(RFP) e a acurácia (ACC) obtiveram a mesma percentagem em ambos os modelos de base estatística.

Ainda assim o RVP não atingiu os 75%, apesar de com a curva da taxa de sucesso (AAC) se ter atingido esse valor mínimo. A taxa de sucesso foi calculada com o grupo de treino ou de modelação ao contrário das tabelas de contingência, que se basearam no grupo de teste do inventário. Outro aspeto que pode justificar a razão pela qual não se atingiram valores de RVP superiores é a resolução espacial do Modelo Digital de Elevação (MDE) do qual se derivaram os fatores topográficos. O MDE foi produzido a partir de altimetria e hidrografia à escala 1: 25 000, logo, este modelo generaliza a variação altimétrica do terreno.

O modelo do Valor Informativo previu melhor a instabilidade à escala da bacia hidrográfica da Meia Légua. No entanto, o modelo de Regressão Logística exibiu uma maior capacidade de discriminação das classes instáveis – suscetibilidade elevada e suscetibilidade muito elevada – permitindo discernir as unidades matriciais de terreno prioritárias a intervir. Para além destas diferenças na validação, não há diferenças significativas entre os dois modelos, A e B.

A simulação de patamares agrícolas com 1 e 2 bardos de vinha (com 2,5 e 3,5m de largura, respetivamente), através do modelo matemático de base física SHALSTAB, permitiu simular a suscetibilidade à ocorrência de movimentos de vertente na bacia da Meia Légua, antecipando o potencial de instabilidade para futuras alterações de armação do terreno. Assim sendo, estes cenários assumem um papel relevante na decisão em termos de gestão do risco.

Esta metodologia de análise não necessita de inventários de ocorrências para a elaboração de cenários como nos modelos estatísticos. Contudo, estes cenários prospetivos devem ser sempre sujeitos a avaliação posterior, recorrendo a um registo de ocorrências e a metodologias de validação, tal como foi elaborado no presente trabalho de investigação.

Recapitulando, foram elaborados 3 modelos prospetivos (A, B e C) para toda a área da bacia hidrográfica da Meia Légua, que posteriormente foram extraídos para 8 áreas alteradas em 2013 de terraços pós-filoxera para sistemas de armação do terreno de patamares com taludes em terra entre muros de pedra em seco, porque quisemos validar a metodologia de simulação em áreas exemplificativas dos novos patamares. Todavia, a instabilidade observada nessas áreas localizou-se, mais uma vez, nos muros de pedra em seco, possivelmente porque os deslizamentos nos taludes são facilmente resolvidos com a utilização de técnicas de mecanização, ao contrário dos muros de xisto de pedra em seco.

Os fatores usados foram os declives e as áreas de contribuição (a/b) segundo o algoritmo Multiple Flow Direction (MD8), bem como, os seguintes parâmetros: 14,81KN/m³ de peso

específico do solo (p_s), 2300N/m² de coesão do solo (c'), ângulo de atrito interno (Φ) de 15, 18 e 20° e espessura do solo instável (z) variável, de acordo com a altura dos patamares (< 0,5 - > 2m).

Pela comparação dos índices de validação das tabelas de contingência não foi possível concluir qual a melhor opção, porque seria sempre o modelo C (15° de Φ) devido ao maior RVP, mas à custa de um aumento das classes de instabilidade, sobretudo da classe cronicamente instável.

O ângulo de atrito interno baseou-se na pesquisa bibliográfica de valores para materiais silto-argilosos, porque não foi possível determinar os valores concretos das amostras de solo com o cálculo em laboratório deste parâmetro.

Portanto, concluímos que os modelos A, B e C podem ser utilizados como indicadores de instabilidade quando se proceder à intervenção no terreno. Consideramos, ainda, que o modelo B (18° de Φ) é o cenário mais concebível, pois este modelo adquiriu valores de RFP inferiores ao modelo C. Além disso, 18° de Φ ajusta-se ao declive médio da Meia Légua e as ocorrências localizaram-se fundamentalmente entre 15 e 25°, independentemente do sistema de armação do terreno.

Vale a pena referir que as dificuldades encontradas com a validação dos cenários de simulação podem ser explicadas pelos inventários utilizados. Os registos da instabilidade que serviram de referência não correspondem a um inventário posterior à modificação do sistema de armação simulado e as ocorrências representam muros caídos ou reconstruídos.

A aplicação desta metodologia de simulação da suscetibilidade possibilitou concluir que, para quem pretende instalar patamares agrícolas, deve optar preferencialmente por terraços de pequena largura para que não sejam altos e com isso controlar os processos de instabilidade. Ademais, consegue-se localizar as áreas onde se pode estabelecer 2 ou somente 1 bardo de vinha.

Quanto às características dos modelos, a análise comparativa possibilitou concluir que, o SHALSTAB possui um maior discernimento das áreas de suscetibilidade, pois a classificação adotada para este método subdivide as áreas instáveis em 4 subclasses de instabilidade e as áreas estáveis em 3 subclasses, contrariamente ao Valor Informativo, que foi classificado segundo 4 classes de suscetibilidade: suscetibilidade nula ou baixa e moderada como áreas estáveis e suscetibilidade elevada e muito elevada como áreas instáveis.

Por outro lado, os cenários de suscetibilidade do SHALSTAB para patamares com 1 bardo de vinha apresentaram uma menor área instável, enquanto os cenários para 2 bardos revelaram um melhor ajustamento à topografia atual da bacia da Meia Légua e ao modelo A do Valor Informativo.

Este trabalho de investigação possibilitou identicamente concluir que é necessário intervir nos muros de pedra em seco da bacia hidrográfica da Meia Léguas. As experiências de observação no terreno permitiram identificar bastantes muros em mau estado de conservação e instáveis, salientando-se diversas áreas continuamente instáveis onde os muros nunca foram reconstruídos. Essas áreas de maior instabilidade consistem em terraços com alturas não adequadas ao declive geral da vertente.

Alguns sistemas de drenagem também não estão adequados aos terraços e, no caso dos novos patamares com taludes em terra, a drenagem faz-se pelos caminhos entre os patamares construídos, para a mecanização dos trabalhos agrícolas.

Posto isto, consideramos que caso o estado de conservação e de estabilidade dos muros fossem melhorados, preveníamos o seu desaparecimento e difundíamos as suas vantagens a nível cultural, económico e paisagístico.

Por fim, futuramente poderiam ser melhorados os seguintes aspetos:

- Aquisição de Modelos Digitais de Elevação (MDE's) com maior resolução espacial que reflitam a variação altimétrica nos terraços agrícolas;
- Registo da instabilidade nos patamares com taludes em terra para a reavaliação dos modelos prospetivos na bacia hidrográfica;
- Cálculo em laboratório do ângulo de atrito interno e da coesão para a Meia Léguas com amostras de solo;
- Realização de mais experiências físicas e hidrológicas junto à base de muros instáveis de modo a perceber melhor porque a instabilidade se desenvolve particularmente nos muros, nomeadamente, perceber se existe obstrução da drenagem interna que conduz à concentração do fluxo e tensão interna dos materiais;
- Atualização da cartografia dos sistemas de armação do terreno, introduzindo o novo tipo de armação dos terraços agrícolas tradicionais reconvertidos em terraços mecanizáveis, para inserir maior detalhe na modelação estatística e averiguar se esse novo tipo de armação do terreno modifica a suscetibilidade.

Referências bibliográficas

Aleotti, P., & Chowdhury, R. (1999). Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 58(1), 21-44. doi: 10.1007/s100640050066.

Bateira, C. (2001). Movimentos de vertente, susceptibilidade geomorfológica e Sistemas de Informação Geográfica. (Dissertação de Doutoramento).

Bateira, C., Martins, L., Santos, M., & Pereira, S. (2011). Cartografia da suscetibilidade a movimentos de vertente na Região Demarcada do Douro (pp. 38). Porto: Universidade Lusófona.

Bateira, C., Seixas, A., Pereira, S., Hermenegildo, C., & Cancela, M. (2005, 22-24 de Setembro de 2005). O comportamento hidrológico de vertentes organizadas em terraços agrícolas no vale do Douro. X Colóquio Ibérico de Geografia, Assoc. Port. Geógrafos, Évora.

Beven, K. J., & Kirkby, M. J. (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin*, 24(1), 43-69. doi: 10.1080/02626667909491834.

Braga, A. C. (2000). Curvas ROC: aspectos funcionais e aplicações. (Tese de Doutoramento), Universidade do Minho, Braga.

Chung, C.-J., & Fabbri, A. G. (2003). Validation of Spatial Prediction Models for Landslide Hazard Mapping. *Natural Hazards*, 30(3), 451-472. doi: 10.1023/B:NHAZ.0000007172.62651.2b.

Chung, C.-J., & Fabbri, A. G. (2008). Predicting landslides for risk analysis — Spatial models tested by a cross-validation technique. *Geomorphology*, 94(3-4), 438-452. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.12.036>.

Coba, Agroconsultores e. (1991). Carta dos Solos, Carta do Uso Actual da Terra e Carta de Aptidão da Terra do Nordeste de Portugal.

Coulomb, C. A. (1776). Essai sur une application des regles des maximis et minimis a quelques problemes de statique relatifs, a la architecture. *Mem. Acad. Roy. Div. Sav.*, 7, 343 – 387.

Crozier, M. J. (2004a). Landslide. In A. S. Goudie (Ed.), *Encyclopedia of Geomorphology* (Vol. 1, pp. 605-608). London, New York: Routledge Ltd.

Crozier, M. J. (2004b). Slope stability. In A. S. Goudie (Ed.), *Encyclopedia of Geomorphology* (Vol. 1, pp. 969 - 970). London, New York: Routledge Ltd.

Das, I., Sahoo, S., van Westen, C., Stein, A., & Hack, R. (2010). Landslide susceptibility assessment using logistic regression and its comparison with a rock mass classification system, along a road section in the northern Himalayas (India). *Geomorphology*, 114(4), 627-637. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.09.023>.

Daveau, S. (1977). *Répartition et Rythme des Précipitations au Portugal*. Lisboa, Centro de Estudos Geográficos.

Daveau, S. (1995). *Portugal Geográfico*. Lisboa: Edições João Sá da Costa.

Dietrich, W. E., & Montgomery, D. R. (1998). SHALSTAB: The Digital Terrain Model for Mapping Shallow Landslide Potential. Paper presented at the National Council for Air and Stream Improvement.

Dietrich, W. E., Reiss, R., Hsu, M.-L., & Montgomery, D. R. (1995). A process-based model for colluvial soil depth and shallow landsliding using digital elevation data. *Hydrological Processes*(9), 383 - 400.

Dietrich, W. E., Wilson, C. J., Montgomery, D. R., & McKean, J. (1993). Analysis of erosion thresholds, channel networks, and landscape morphology using digital terrain model. *Journal of Geology*(101), 259 - 278.

Dikau, R. (2004a). Factor of Safety. In A. S. Goudie (Ed.), *Encyclopedia of Geomorphology* (Vol. 1, pp. 359-360). London, New York: Routledge Ltd.

Dikau, R. (2004b). Mass movement. In A. S. Goudie (Ed.), *Encyclopedia of Geomorphology* (Vol. 1, pp. 644-653). London, New York: Routledge Ltd.

Dikau, R., Brunsden, D., Schrott, L., & Ibsen, M.-L. (1996). *Landslide Recognition*. Chichester: Wiley.

Faria, A. (2014). *Avaliação da Sustentabilidade a Movimentos de Vertente por Método Matemático de Base Física e de Base Estatística: Estudo Comparativo no Vale do Douro Vinhateiro*. (Dissertação de Mestrado), Universidade do Porto, Porto.

Faria, A., Bateira, C., Soares, L., Fernandes, J., Oliveira, A., Teixeira, M., Gonçalves, J. A. & Marques, F. (2015, 8-10 de Outubro de 2015). Instabilidade em Terraços Agrícolas no Vale do Douro, Pinhão. *Modelação Matemática de Base Física*. VII Congresso Nacional de Geomorfologia. Instituto de Geografia e Ordenamento do Território, Universidade de Lisboa, Associação Portuguesa de Geomorfólogos, Lisboa. [Artigo submetido e aceite à espera de ser publicado].

Fawcett, T. (2006). An introduction to ROC analysis. *Pattern Recogn. Lett.*, 27(8), 861-874. doi: [10.1016/j.patrec.2005.10.010](http://dx.doi.org/10.1016/j.patrec.2005.10.010).

Fernandes, N. F., Guimarães, R. F., Gomes, R. A. T., Vieira, B. C., Montgomery, D. R., & Greenberg, H. (2001). Condicionantes Geomorfológicos dos Deslizamentos nas Encostas: Avaliação de Metodologias e Aplicação de Modelo de Previsão de Áreas Susceptíveis. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 2(1), 51 - 71.

Ferreira, D. d. B. (2005). O Ambiente Climático. In C. A. Medeiros (Ed.), *Geografia de Portugal* (Vol. I - Ambiente Físico, pp. 495). Lisboa: Círculo de Leitores.

Figueiredo, T. (2013). Uma panorâmica sobre os recursos pedológicos do Nordeste Transmontano. In I. P. d. Bragança (Ed.), *Série Estudos* (Vol. 84, pp. 47). Bragança: Instituto Politécnico de Bragança.

Folk, R. L. (1954). The distinction between grain size and mineral composition in sedimentary rock nomenclature. *Journal of Geology*(62 (4)), 344 - 359.

Geotechdata.info. (2013). Angle of Friction. from <http://www.geotechdata.info/parameter/angle-of-friction.html>.

Guimarães, R. F., Montgomery, D. R., Greenberg, H. M., Fernandes, N. F., Trancoso G., R. A., & Carvalho Júnior, O. A. d. (2003). Parameterization of soil properties for a model of topographic controls on shallow landsliding: application to Rio de Janeiro. *Engineering Geology*, 69(1-2), 99-108. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0013-7952\(02\)00263-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0013-7952(02)00263-6).

Highland, L. M., & Bobrowsky, P. (2008). *The landslide handbook - A guide to understanding landslides* (Vol. Circular 1325). Reston, Virginia: U.S. Geological Survey.

Holmgren, P. (1994). Multiple flow direction algorithms for runoff modelling in grid based elevation models: an empirical evaluation. *Hydrological Processes*, 8, 327-334.

Hosmer, D.W., & Lemeshow, S. (2000). *Applied Logistic Regression*. New York: John Wiley & Sons.

Hutchinson, J. N. (1968). Mass Movement. In R. W. Fairbridge (Ed.), *Encyclopedia of Geomorphology* (pp. 688 - 695). New York: Reinhold.

Hutchinson, J. N. (1988). General report: Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology. In C. Bonnard (Ed.), *Landslides. Proceedings of the Fifth International Symposium on Landslides*. Lausanne. (Vol. 1, pp. 3 - 35). Rotterdam: Balkema.

IVDP, Instituto dos Vinhos do Douro e Porto. (s/d). *Manual de Boas Práticas Vitícolas - Região Demarcada do Douro*. Paper presented at the Projeto SUBVIDUR.

Julião, R., Nery, F., Ribeiro, J., Branco, M., & Zêzere, J. (2009). Guia Metodológico para a Produção de Cartografia Municipal de Risco e para a Criação de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) de Base Municipal (pp. 93): ANPC.

Kohavi, R., & Provost, F. (1998). On Applied Research in Machine Learning Editorial for the Special Issue on Applications of Machine Learning and the Knowledge Discovery Process (Vol. 30). New York: Columbia University.

Lewis, D. D., & Gale, W. A. (1994). A sequential algorithm for training text classifiers. Paper presented at the Proceedings of the 17th annual international ACM SIGIR conference on Research and development in information retrieval, Dublin, Ireland.

Mayson, R. (1999). Port and the Douro. London: Faber and Faber.

Montgomery, D. R., & Dietrich, W. E. (1994). A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. *Water Resources Research*, 30(4), 1153-1171. doi: 10.1029/93WR02979.

Montgomery, D. R., Sullivan, K., & Greenberg, H. M. (1998). Regional Test of a Model for Shallow Landslides. *Hydrological Processes*, 12, 943 - 955.

Moreira, N., Búrcio, M., Dias, R., & Coke, C. (2010). Partição da deformação Varisca nos sectores de Peso da Régua e Vila Nova de Foz Côa (Autóctone da Zona Centro Ibérica). *Comunicações Geológicas*(97), 147 - 162.

Nel, D T, & Haarhoff, J. (2011). The failure probability of welded steel pipelines in dolomitic areas. *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, 53, 9-21.

Oliveira, A. (2014). Avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente no vale do Douro (Quinta das Carvalhas). Influência dos MDE's na modelação matemática de base física e estatística. (Dissertação de Mestrado), Universidade do Porto, Porto.

O'Loughlin, E. M. (1986). Prediction of Surface Saturation Zones in Natural Catchments by Topographic Analysis. *Water Resources Research*, 22(5), 794 - 804.

Panizza, M. (1975). Ricerche di geomorfologia applicata alla pianificazione territoriale. *Mem Soc Geol It*(14), 109 - 112.

Pedrosa, A.; Martins, M.; Pedrosa, F. (2004) – Processos de erosão acelerada. Região Demarcada do Douro: um património em risco. *Douro-Estudos & Documentos*, nº17, 213-238.

Pereira, S. (2009). Perigosidade a Movimentos de Vertente na Região Norte de Portugal. (Dissertação de Doutoramento), Faculdade de Letras da Universidade do Porto, Porto.

Pereira, S., Bateira, C., Hermenegildo, C., & Seixas, A. (2006, 14-16 de Setembro de 2006). III. Análise comparativa do escoamento em terraços de áreas granitóides e metassedimentares.

Atas das Jornadas sobre Terraços e Prevenção de Riscos Naturais, Parque de Tecnologias Ambientais de Maiorca, Palma de Maiorca.

Quinn, P., Beven, K., Chevallier, P., & Planchon, O. (1991). The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modeling using digital terrain models. *Hydrological Processes*, 5(nrº 1), 59-79.

Raia, S., Alvioli, M., Rossi, M., Baum, R. L., Godt, J. W., & Guzzetti, F. (2014). Improving predictive power of physically based rainfall-induced shallow landslide models: a probabilistic approach. *Geoscientific Model Development*(7), 495-514. doi: 10.5194/gmd-7-495-2014.

Rodrigues, M. L. (1998). *Evolução Geomorfológica Quaternária e Dinâmica Actual. Aplicações ao Ordenamento do Território. Exemplos no Maciço Calcário Estremenho.* (Dissertação de Doutoramento), Universidade de Lisboa, Lisboa.

Santos, D. V. dos, & Sari, V. (2011). *Fotointerpretação (C. P. d. USFM, Trans.)* (pp. 53). Santa Maria, RS, Brasil: Universidade Federal de Santa Maria.

Selby, M. J. (1993). *Hillslope: Materials and Processes*. Oxford, England: Oxford University Press.

Sørensen, R., Zinko, U., & Seibert, J. (2006). On the calculation of the topographic wetness index: evaluation of different methods based on field observations. *Hydrology and Earth System Sciences*, 10(1), 101-112.

Spangler, M. G. & Handy, R. L. (1984). *Soil engineering*. New York: Harper & Row.

Süzen, M., & Doyuran, V. (2004). A comparison of the GIS based landslide susceptibility assessment methods: multivariate versus bivariate. *Environmental Geology*, 45(5), 665-679. doi: 10.1007/s00254-003-0917-8.

Tarboton, D. G. (1997). A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water Resources Research*, 33(nrº 2), 309-319.

Teixeira, M. (2012). *Avaliação da suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos translacionais superficiais: Utilização de modelos matemáticos de base física na Bacia de Tibo, Arcos de Valdevez.* (Dissertação de Mestrado), Universidade do Porto Retrieved from <http://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/66344>.

Teixeira, M., Bateira, C., Marques, F., & Vieira, B. (2014). Physically based shallow translational landslide susceptibility analysis in Tibo catchment, NW of Portugal. *Landslides*, 12(3), 455-468. doi: 10.1007/s10346-014-0494-9.

Terzaghi, C. (1925). *Principles of Soil Mechanics*. *Engineering News-Record* (95), 19 - 27.

UNESCO. (Ed.) (1993). The International Geotechnical Societies' UNESCO Working Party on World Landslide Inventory (WP/WLI). Canada: BiTech Pubs.

Varnes, D. J. (1958). Landslides Types and Processes. In E. B. Eckel (Ed.), Landslides and Engineering Practice. Highway Research Board. Special Report 29. (pp. 20 - 47): National Academy of Sciences.

Varnes, D. J. (1978). Slope Movement Types and Processes. In R. L. Schuster & R. J. Krizek (Eds.), Landslides, Analysis and Control. Transportation Research Board. Special Report 176. (pp. 11 - 33). Washington D. C.: National Academy Press.

Varnes, D. J. & Landslides, IAEG Commission on. (1984). Landslide hazard zonation – a review of principles and practice (pp. 63). Paris: UNESCO.

Vieira, B. C. (2007). Previsão de escorregamentos translacionais rasos na Serra do Mar (SP) a partir de modelos matemáticos em bases físicas. (Tese de Doutorado), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

Ward, S. (2004). Cohesion In A. S. Goudie (Ed.), Encyclopedia of Geomorphology (Vol. 1, pp. 172-173). London, New York: Routledge Ltd.

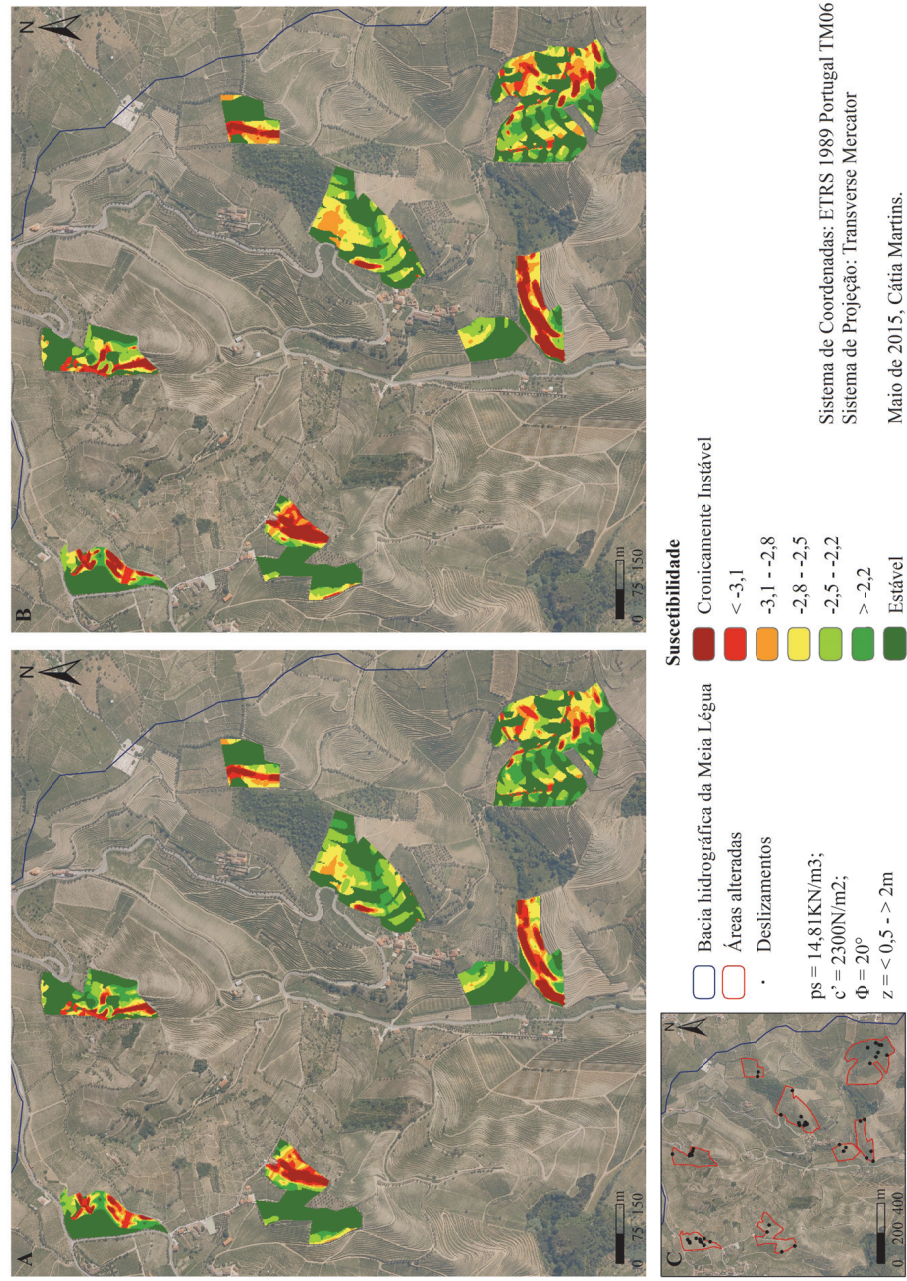
Yan, T. Z. (1988). Recent advances of quantitative prognoses of landslides in China. In C. Bonnard (Ed.), Landslides. Proceedings of the Fifth International Symposium on Landslides. Lausanne. (Vol. 2, pp. 1263 - 1268). Rotterdam: Balkema.

Yin, K. L.; Yan, T. Z. (1988). Statistical prediction models for slope instability of metamorphosed rocks. In C. Bonnard (Ed.), Landslides. Proceedings of the Fifth International Symposium on Landslides. Lausanne. (Vol. 2, pp. 1269 -1272). Rotterdam: Balkema.

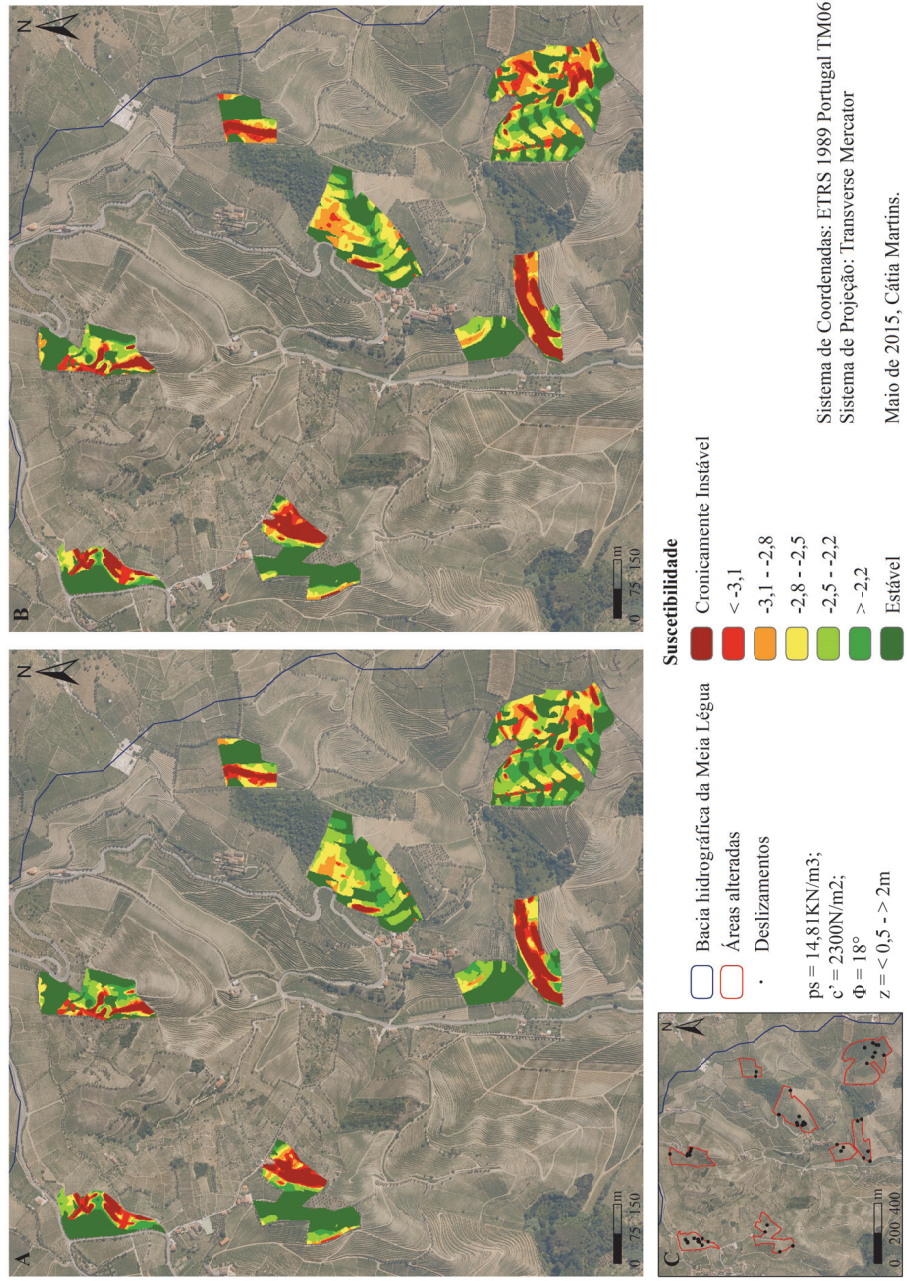
Zêzere, J. L. (1997). Movimentos de Vertente e Perigosidade Geomorfológica na Região a Norte de Lisboa. (Dissertação de Doutorado), Faculdade de Letras da Universidade de Lisboa, Lisboa.

Zêzere, J. L. (2005). Dinâmica de vertentes e riscos geomorfológicos. Programa. In C. d. E. G. U. d. Lisboa (Ed.), (pp. 37-101). Lisboa: Centro de Estudos Geográficos – Universidade de Lisboa.

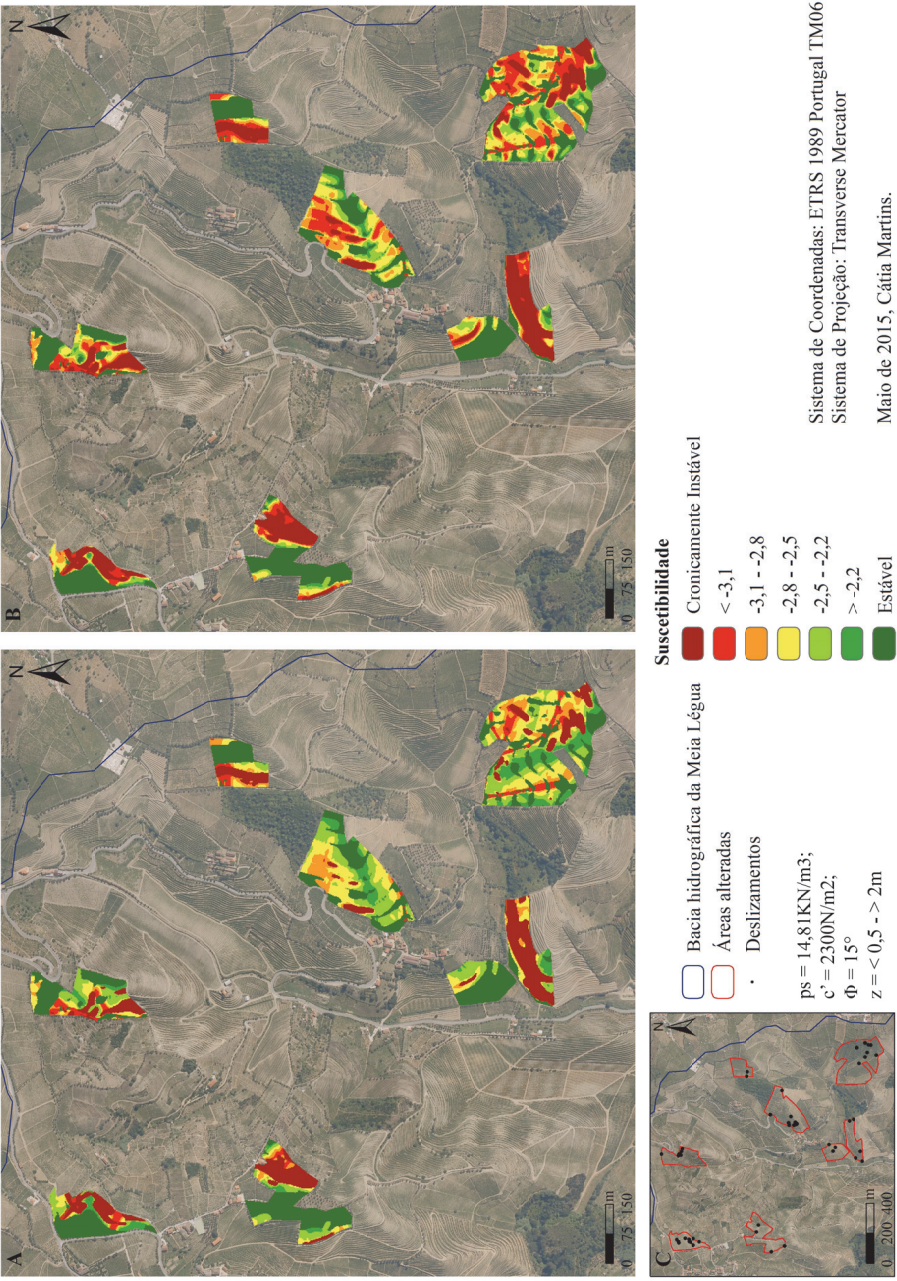
Anexos



Anexo 1 - Suscetibilidade à ocorrência de movimentos de vertente segundo o SHALSTAB nas áreas alteradas em 2013. A) simulação para patamares com 1 bardo de vinha; B) simulação para patamares com 2 bardos de vinha. Fonte: IGEOE.



Anexo 2 - Suscetibilidade à ocorrência de movimentos de vertente segundo o SHALSTAB nas áreas alteradas em 2013. A) simulação para patamares com 1 bardo de vinha; B) simulação para patamares com 2 bardos de vinha. Fonte: IGEOE.



Anexo 3 - Suscetibilidade à ocorrência de movimentos de vertente segundo o SHALSTAB nas áreas alteradas em 2013. A) simulação para patamares com 1 bardo de vinha; B) simulação para patamares com 2 bardos de vinha. Fonte: IGEOE.